

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Únosnost tmelených horninových svorníků

Bearing Capacity of Bonded Rock Bolts

Student:

Bc. Alice Hastíková

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Alice Hastíková**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **3607T035 Geotechnika**
Téma: **Únosnost tmelených horninových svorníků**
Bearing Capacity of Bonded Rock Bolts

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Současný stav - přehled stavu kotvení prostředků, metod a materiálů tmelení horninových svorníků; přehled způsobů aplikace tmelených horninových svorníků v podzemních a báňských dílech
3. Rozbor činnosti a stanovení únosnosti soustavy horninový svorník - tmelící prstenec - horninový masiv.
4. Doporučení a návrhy parametrů tmelených horninových svorníků pro nejčastější aplikace v podzemních a báňských dílech.
5. Příklady aplikací z praxe.
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

KIM, N. K., PARK, J. S., KIM S. K. *Numerical simulation of ground anchors*. Computers and Geotechnics, 2007, 34, s. 498–507
OSTERMAYER, H., BARLEY, A.D. *Fixed Anchor Design Guidelines*. In Geotechnical Engineering Handbook Vol. 2. Berlin : Ernst & Sohn, 2003.
WICHTER, I., MEINIGER, W. *Verankerungen und Vernagelungen im Grundbau*. Berlin : Ernst & Sohn, 2000. ISBN 3-433-01216-4

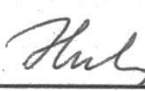
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

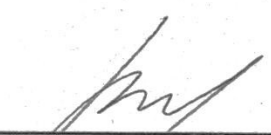
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 28.02.2013

Datum odevzdání: 02.12.2013




doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Darja Kubečková, Ph.D.
děkanka fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracovala samostatně
pod vedením vedoucího diplomové práce
a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byla jsem seznámena s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

Diplomová práce se zabývá únosností pasivních tmelených horninových svorníků. Poukazuje na možné způsoby porušení a představuje druhy a šíření trhlin, které vznikají tahem tyče v její těsné blízkosti v prstenci tmele. Podrobněji se zabývá ztrátou únosnosti na kontaktu mezi tyčí a tmelem s důrazem na vliv žebírek. Žebírka všeobecně zvyšují smykovou únosnost na kontaktu mezi tmelem a tyčí, avšak vyvolávají koncentraci napětí, která jsou příčinou vzniku trhlin.

V praktické části diplomové práce byla uskutečněna laboratorní zkouška tahem zatíženého svorníku simulující namáhání svorníku v kořenové délce. Svorník se skládal z ocelové žebírkové tyče, tmele z malty cementové a kvádru betonu nahrazující okolní horninu. Výstupem praktické části jsou v laboratoři stanovené pracovní-deformační křivky tahem zatížené žebírkové tyče a svorníku dvojí kořenové délky.

Laboratorní zkouška byla namodelována MKP v softwaru Plaxis 2D v axisymetrické úloze a v softwaru Midas GTS 3D. Byly vyhodnocovány napětí-deformační stavy, při kterých dochází k porušení v prstenci tmele a průběh posunů po kořenové délce svorníku.

Klíčová slova: horninový svorník, únosnost horninových svorníků, žebírka, trhliny, modelování laboratorní zkoušky svorníku

Annotation

The diploma thesis focuses on bearing capacity of passive bonded rock bolts (dowels). It points out possible ways of losing the bearing capacity and introduces types of cracks and their spreading, which are formed by pulling the bolt in close vicinity to the bolt-grout contact area. Failure at bolt-grout interface is investigated in more detail with respect to effect of ribs. Ribs generally increase shearing capacity at the interface but they also cause stress concentrations and the associated development of cracks.

Laboratory rock bolt pull-out tests have been carried out in order to simulate stress distribution in anchor length of the rock bolt. The pull-out tests have been conducted

on rebar, grouted into concrete with cement mortar. Stress-strain dependence of rebar and rock bolts of two different anchor lengths are the outputs of the practical part.

Laboratory test has been simulated by numerical modeling FEM in software Plaxis 2D axisymmetry and in software Midas GTS 3D in order to evaluate stress-strain state before failure and progress of displacements along anchor length.

Key words: rockbolt, bearing capacity of rock bolt, ribs, cracks, modeling of laboratory test of rockbolt

Obsah

Svorník a jeho historie.....	1
Dnešní pojem svorníku.....	2
Základní dělení horninových svorníků	3
Únosnost svorníku.....	8
Zatížení a namáhání svorníku.....	8
Způsoby porušení svorníku	11
Rozbor kontaktu mezi tmelem a horninou.....	15
Rozbor kontaktu mezi tmelem a tyčí	17
Trhliny v těsné blízkosti kontaktu mezi tmelem a tyčí	19
Praktická část.....	27
Laboratorní zkouška	27
Modelování tahové zkoušky pomocí MKP	34
Plaxis 2D.....	34
Midas GTS	40
Shrnutí praktické části	44
Závěr.....	48
Použitá literatura	50

Svorník a jeho historie

Svorník je liniový výztužný prvek, který aktivně podporuje nestabilní horninový masiv, nebo v případě stabilního masivu zvyšuje jeho stabilitu. Aktivní výztuží je z toho důvodu, že svými třecími schopnostmi dokáže spolupracovat s okolní horninou tak, že ji využívá při přenosu zatížení. Svorník je kompozicí kotevního prvku s vysokou tahovou únosností a spojujícího média, jehož funkcí je efektivní přenos mezi kotevním prvkem a horninou. Posledním členem této kompozice je hornina, která by měla být také považovaná za součást svorníku, přinejmenším její kontaktní povrch a v nejlepším případě do takových vzdáleností, kdy již není masiv instalací svorníku ovlivněn, neboť aktivní výztuž bez přenosu zatížení masivem neexistuje.

Původní verze svorníků byly dřevěné tyče, které se používaly pro stabilizaci nezajištěných prostor před čelbou v dolech ve Velké Británii, pod vedením pana Beyla (1912). Po odmítnutí téměř půl století dlouhé se jimi zabýval až pan Rabcewicz (1955). Dalším badatelem byl pan Panek (1956), který popsal efekt zavěšení desky na svorníky, anebo pan Evans (1961), který se zabýval stlačením desek svorníkováním, přičemž stanovil jednoduchou formuli pro určení limitního stavu. Oba tito pánové studovali svorníky jak teoreticky, tak je i experimentálně aplikovali v důlních dílech. Pan Rabcewicz a jeho spolupracovníci se také snažili propojit tuto aktivní výztuž s tehdy se teprve vyvíjející tunelovací metodou Novou Rakouskou Tunelovací Metodou (1957). Známý experiment svorníkování šterku s použitou sítí a tím vytvoření únosného šterkovitého bloku je přinutil pohlížet na svorníky jako na prvek, který je schopný mobilizovat inherentní únosnost horniny. (převzato a upraveno z [2])

Výztužný efekt svorníků je všeobecně klasifikován následujícími vlivy (převzato a upraveno z [2]):

1. aplikace vnitřního plošného tlaku na obrys díla (patří mezi základní principy NRTM)
2. zlepšení fyzikálních vlastností vyztuženého masivu
3. efekt zavěšení
4. zvýšení smykového napětí na plochách diskontinuit
5. efekt propojení desek (vytvoření teoretické podpory spojitě desky = snížení průhybu)
6. vytvoření únosné klenby

Dnešní pojem svorníku

Vzhledem k tomu, že svorník není zcela přesně v žádné literatuře ani v normě definován, (vyjma norem mimo EU, které nebyly prostudovány) je nutné vymezit jeho obecnou definici a funkci, a vyčlenit jej od ostatních kotevních systémů.

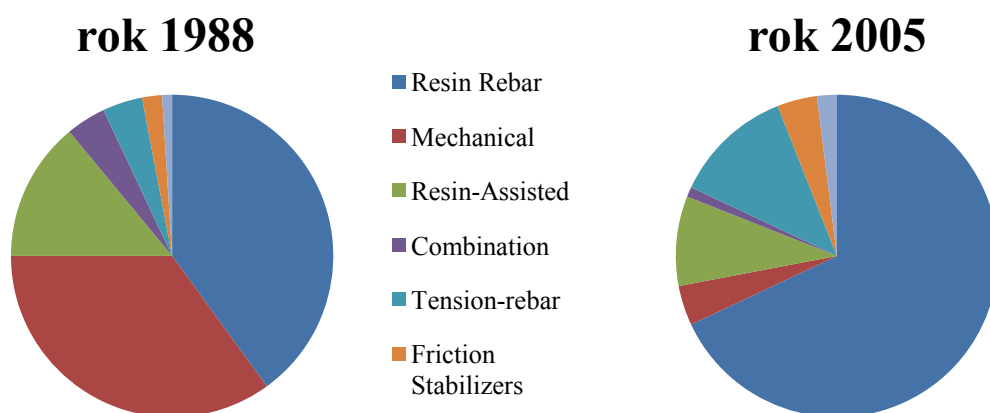
Britská norma [6] jej popisuje jako tyč vloženou do stropu nebo do boků díla s použitím obklopující pryskyřice jako součást systému svorníku. Tato definice však není zcela přesná, neboť zapomíná na kotvení tmely na cementové bázi. Svorník by měl být rozlišen od Injektované horninové kotvy dle ČSN EN 1537 a od Long Tendons (od kotev použitých pro vysoké kotvení) dle BS 7861 – Part 2. V těchto případech mají kotvy danou funkci – přenášet zatížení vyvolané konstrukcí do vzdálenějších míst, kde je hornina schopna přenést zatížení. V případě vysokého kotvení se jedná například o konstrukci té části masivu, která je vyztužena svorníky.

Dalším kotevním systémem, jenž se různí od svorníků je hřebík (nail). Soil nebo rock nail, zeminový nebo horninový hřebík je namáhán na stříh v oblasti smykové plochy respektive relativním posunem masivu na plochách diskontinuit, a teprve přetvořením (deformací) zapříčiněné namáháním na stříh v kritické oblasti masivu vyvolává sekundární tahové namáhání svorníku a způsobuje prodloužení svorníku. (Poznámka: Svorník je samozřejmě taky namáhán na stříh a často dochází v hornictví k jeho porušení právě stříhem způsobeného usmyknutím horninových bloků, avšak jeho primární funkcí je odolat tahovým namáháním.)

Svorník je liniový kotevní prvek, který vyztužuje tu část masivu, ve které je instalován a se kterou je v celoplošném kontaktu. Jeho funkcí je tedy zlepšení vlastností masivu v jeho okolí, které jej namáhá převážně tahově, a zabránění jeho posunům prostřednictvím plášťového tření na jeho povrchu. Svorník aktivuje samonosnost horninového masivu. Není potřeba ho předepínat, ale jeho předepínání je možné. Podle toho, zdali je svorník předepnut nebo není, se rozlišují svorníky pasivní (dowels) - nepředepnuté a aktivní (activated rockbolts) - předepnuté. Pasivními svorníky bývají většinou tyče 3 metry dlouhé, aktivními svorníky mohou být flexibilní svorníky např. pramencové (lanové), které ale také předepnuty být nemusí.

Na 25. mezinárodní konferenci on Ground Control in Mining představili páni Tadolini a Mazzoni [18] zajímavý přehled použitých svorníků, jehož obsah je vhodné zde využít,

byť se jedná o přehled užití svorníků ve Spojených státech amerických. Následující graf autoři převzali z [15].



graf č. 1 – použití svorníků v USA

Graf je významný značným nárůstem procentuálního využití svorníků tmelených po celé délce pryskyřicí a stejně významným poklesem svorníků bodově mechanicky kotvených v letech 1988 a 2005. Další anglické názvy znamenají: Resin Rebar – svorníky tmelené po celé délce pryskyřicí, Mechanical – svorníky bodově mechanicky ukotvené, Resin-Assisted – svorníky mechanicky bodově ukotvené s asistencí tmeleného kořene pryskyřicí, Combination – kombinace, Tension-rebar – svorníky tmelené po celé délce, předepnuté a poslední Friction Stabilizers – frikční (třecí) svorníky.

V ostravsko-karvinském revíru je situace podobná. V současné době se hloubka dobývání v těchto obtížných podmínkách pohybuje kolem 1000 m pod povrchem. V takových hloubkách dochází k výrazným deformacím důlních chodeb především v návaznosti na vlastní dobývání. Právě proto dochází v současné době k masivnímu nárůstu používání různých typů kotevních systémů (např. pramencové kotvy upnuté v kořeni, svorníky lepené po celé délce). (převzato a upraveno z [16])

Základní dělení horninových svorníků

Svorníky se dělí podle:

- ❖ způsob upínání do horninového prostředí
 - mechanicky
 - ◆ bodově

- ◆ po celé délce
 - HUS – hydraulicky upínaný svorník
 - frikční
 - tmelem
 - ◆ tmely na bázi pryskyřice
 - ◆ tmely na bázi cementu
- ❖ profil kotevního prvku
 - lano
 - tyč
 - podélně zborcený profil
- ❖ materiál kotevního prvku
 - ocel
 - kompozit
- ❖ způsob instalace
 - vkládaný způsob
 - samozavrtávací způsob

Způsob instalace je závislý na tom, zdali je kotevní tyč dutá nebo plná. Pokud je tyč dutá, na jejím konci je umístěna vrtná korunka, jejímž prostřednictvím je vyvrtán vývrt. Po ukončení vrtání je vnitřním průchodem tyče vháněn tmel, který následně otvory v korunce prochází po vnějším plášti tyče zpětně k hlavě svorníku. Tímto způsobem je zaručeno, že svorník je po celé délce zatmelen. Tento způsob instalace je nazván jako samozavrtávací systém (SDA - Self Drilling Anchor). Tyče jsou opatřeny po celé délce R nebo T závitem [19]. Tyto závity se liší obzvláště svou geometrií a směry otáčení, které jsou dány již zavedenými a nejpoužívanějšími nástavci a jiných článků systému (spojky, závit korunky atd.) jak v hornictví, tak v podzemním stavitelství. Tento typ svorníků je dražší v porovnání se vkládaným způsobem instalace, zvláště díky ztracené korunce v kořeni svorníku.

Vkládaný způsob instalace je nejpoužívanějším a nejtradičnějším způsobem. Nejprve je vyvrtán vývrt, do kterého je pod tlakem vháněn tmel. Do zatmeleného vývrtu je postupně vkládána kotevní tyč, anebo je do vývrtu vsunuta kotevní tyč spolu s hadičkami. První hadičkou je veden do vývrtu tmel a druhou hadičkou je vysáván vzduch.

Jinak vypadá instalace při použití kapslí LOKSET [19]. Je-li svorník předpínán, na dno vývrtu je vložena kapsle s vyšší rychlostí nárůstu pevnosti, za ni jsou vloženy kapsle s pomalejším nárůstem pevnosti. Svorník je instalován dle technologického postupu o dané rychlosti otáčení a rychlosti vsunutí. Po dosažení dostatečné pevnosti tmele v kořeni je svorník předepnut. Není-li svorník předpínán, je instalace obdobná s výjimkou použití kapslí o stejném nárůstu pevnosti.

❖ aktivace svorníku

- napínání svorníku při jeho instalaci (aktivní svorník)
- napínání způsobené posuny masivu (pasivní svorník)

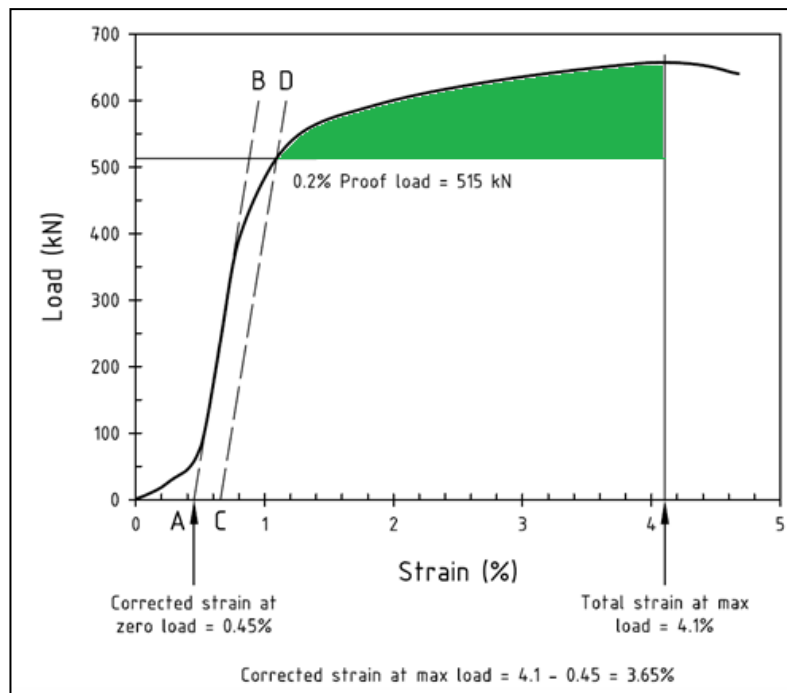
Otázkou tedy zůstává, kdy svorník předepínat a kdy ne. Později bude vysvětleno, že při velkých tlacích působících na stěny vývrtu únosnost tmeleného svorníku vzrůstá, dále pak v případech, kdy je tlaková pevnost horniny malá, např. v jílovci je efektivnější svorník nepředepínat a zaručit přenos zatížení tmelením po celé délce.

Horníci často směřují pojem aktivace – předepnutí svorníků s pojmem aktivace plášťového tření. U pasivních svorníků se často utahuje matice a tím se v blízkosti hlavy svorníku aktivuje plášťové tření. Tímto je aktivováno smykové napětí na kontaktním povrchu mezi tmelem a horninou, ale nejedná se o předepnutí.

❖ dle napjatosti masivu

- svorníky instalované v podzemních dílech
- svorníky instalované v báňských dílech

V grafu č. 2 je znázorněna pracovní-deformační charakteristika při tahové zkoušce oceli. Ocel pro kotvení („hornická ocel“) nabývá takových pracovních deformačních charakteristik, které nejsou vyznačeny mezi kluzu, proto je za mez kluzu považována taková pevnost, která je průsečíkem rovnoběžky s tečnou křivky vedené ve vzdálenosti 0,2% přetvoření.



graf č. 2 – příkladná pracovně deformační charakteristika oceli
(převzato a upraveno z [6])

Důležitou vlastností kotevních prvků svorníků je tažnost a neméně důležitou vlastností je poměr mezi mezí kluzu a mezí pevnosti. Tažnost u tyčí by měla být minimálně 18%, u flexibilních svorníků (pramencových) dosahuje hodnot okolo 5%, ale vzhledem k jejich poddajnějším vlastnostem se může jednat o stejné hodnoty poměrného prodloužení.

V grafu č. 2 je zeleně vyznačena oblast plastického chování při tahové zkoušce oceli. Mez kluzu je velice důležitá u svorníků používaných v tunelech. U takových svorníků se všeobecně předpokládá, že budou namáhány v pružné fázi pracovně deformační charakteristiky, kdežto u kotevních prvků svorníků používaných v hornictví tomu tak není. U svorníků použitých v důlních dílech je důležitá právě tažnost svorníku. Aby byl tento rozdíl blíže pochopen, je nutné vysvětlit primární rozdíl mezi napětíodeformačním stavem v tunelech a v důlních dílech.

V podzemních dílech jsou svorníky nejčastěji využity jako aktivní výztuž spolu s kombinací s výztuží pasivní – KARI síť + příhradovina + SB při ražbě tunelu NRTM. Známé Fenner-Pacherovy křivky vysvětlují napětíodeformační princip přenosu zatížení od horniny výztuží. Hodnoty zatížení, kterými jsou svorníky namáhány, nabývají hodnot 15 ~ 20 tun. (konzultace s panem Ing. Adamem Janíčkem)

V báňských dílech je situace mnohem komplikovanější. Vysoké hodnoty napětí, nepředvídatelnost a stížené pracovní podmínky naznačují, že se zde jedná o úplně jinou problematiku než v podzemních dílech. V báňských dílech ražba probíhá v hloubkách blízkých kritické hloubce, kde dochází ke zplastizování horniny po vyrubání díla.

Po vyrubání díla je snaha okamžitě výrub (porub) stabilizovat a zabránit závalu. Jakým způsobem instalace, kolika svorníky a jakých délek mají svorníky být, je stanoveno v projektu samostatné svorníkové výztuže, kde dle geotechnického posouzení a stanovení geomechanického parametru RMR se stanoví vhodnost samostatného svorníkování a stabilitní posouzení spolu s výpočtem parametrů svorníkové výztuže.

V hornictví bývají svorníky namáhány zatížením 30 ~ 100 tun (konzultace s panem Ing. Adamem Janičkem). Nahodilost posunů na obrysech výrubů, rychlost a intenzita těchto posunů jsou v hornictví obvyklá a nedá se jím zabránit. Právě v takových chvílích může být tažnost nejdůležitějším parametrem svorníků použitých v báňských dílech. Posuny jsou tak význačné, že se nemůže předpokládat pružné přetvoření svorníku. Dochází ke zplastizování kotevního prvku a míra jeho porušení (funkce času či funkce přetvoření) je právě dána jeho tažností.

Po vyrubání báňského díla nedochází k uvolňování napětí, jako tomu bývá u podzemních děl, ale rovnou dochází ke zvyšování napětí a dále hodnoty primární napjatosti jsou několikanásobně vyšší než v podzemních dílech.

V hornictví je nejlepší možností zajištění stability stropu a boků okamžitou instalací tyčových pasivních svorníků, které se posuny masivu aktivují. Na základě měření inklinometry se vyhodnocují posuny až ve třech úrovních vzhledem k výšce od obrysu výrubu. Pokud tato měření vyhodnotí relativní posuny (rozdíl mezi posunem na obryse díla a posunem konce drátu) do vzdálenosti délky svorníků, je nutno svorníky zhustit, pokud jsou relativní posuny vyhodnoceny v místech nad svorníky, je nutno instalovat svorníky takových délek, aby zasahovaly do nerozvrstvené zóny minimálně půl metru. Dále je možné aplikovat vysoké kotvení, tedy zavěsit takto vyztužený masiv do vyšších míst.

Únosnost svorníku

Pokud bude v této práci zanedbán vliv zhlaví svorníku, aktivace plášťového tření svorníku utažením matice a předeptnutí svorníku, tedy aspekty, které ovlivňují vnější únosnost svorníku a pokud bude okolní hornina předpokládána za homogenní izotropní prostředí, pokud bude uvažováno s dodržением technologických postupů při instalaci tak, aby byl zaručen efektivní přenos zatížení po celém povrchu tyče, prstence tmele a povrchu vývrtu, vnitřní únosnost lze definovat těmito body:

Vnitřní únosnost je dána:

- vlastnostmi kotevního prvku:
 - průřezová plocha, geometrie závitu (výška a rozteč žebírek)
 - pracovní-deformační charakteristika kotevního prvku
- vlastnostmi tmele
 - pevnostní a deformační vlastnosti
- vlastnostmi okolní horniny
 - pevnostní a deformační vlastnosti
 - předpoklad homogenní okolí (zanedbání koeficientu RMR)
 - drsnost povrchu vývrtu
 - tlak působící na stěny vývrtu

Zatížení a namáhání svorníku

Svorník je zatížen plášťovým třením mezi stěnou vývrtu a tmelem, vyvolaným posuny masivu podél zdvižné délky svorníku. Toto plášťové tření se dále přenáší tmelem (spřažením a smykovou pevností na kontaktu prut-tmel) do kotevního prvku, který je tahově namáhán po celé délce. Takto tažená kotevní tyč mobilizuje v kořenové délce v prstenci tmele namáhání v podobě tlaku a tahu za smyku (přenos spřažením (přítomnost žeber) a smykovou pevností na kontaktu prut-tmel), které je tmelem přenášeno k povrchu vývrtu směrem do horniny plášťovým třením na kontaktu tmel-hornina.

Takto mobilizované smykové napětí podél délky svorníku je dle obr. č. 1 rozděleno na dvě části, pick-up length a anchor length, tedy zdvižná délka a kořenová délka. Zdvižná délka svorníku brání okolní hornině v posunech směrem do díla, kdežto v kořenové délce naopak

hornina brání svorníku v posunech. Výsledkem tohoto je změna směru působícího smykového napětí, které v neutrální zóně nabývá nulových hodnot. Necht' je průběh smykového napětí po kořenové délce svorníku vyjádřen tahovou silou způsobenou posuny masivu podél zdvižné délky svorníku:

$$-dQ_z = \pi d \tau_z dz \quad [1]$$

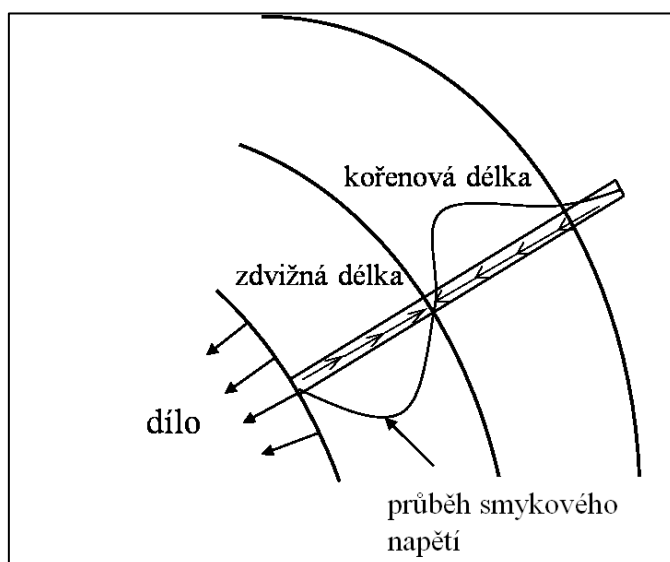
$$\tau_z = -\frac{1}{\pi d} \frac{dQ_z}{dz} = -\frac{r_b}{2} \frac{d\sigma_z}{dz} \quad [2]$$

kde: průměr tyče (d) = 2 x poloměr tyče (r_b),

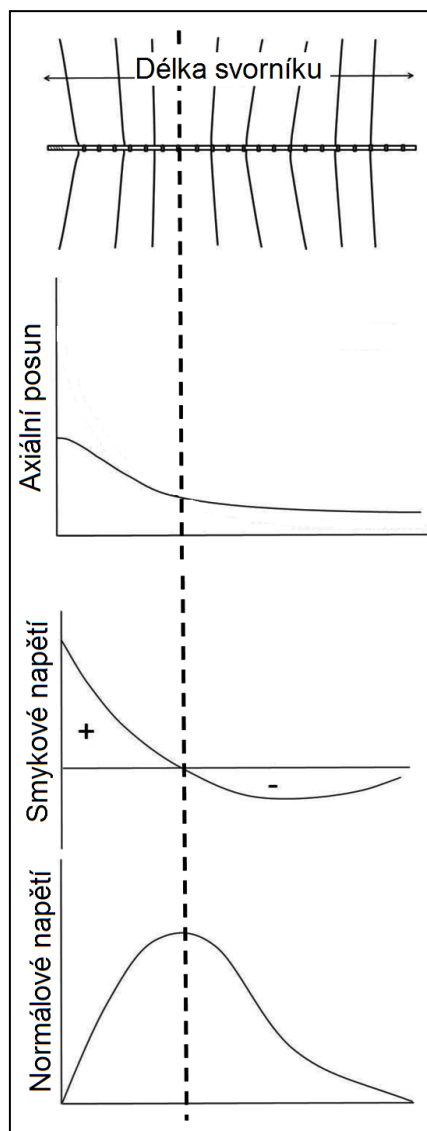
Q_z je tahová osová síla,

σ_z je normálové napětí svorníku

τ_z je smykové napětí svorníku.



obrázek č. 1 – rozdělení svorníku na zdvižnou a kořenovou délku

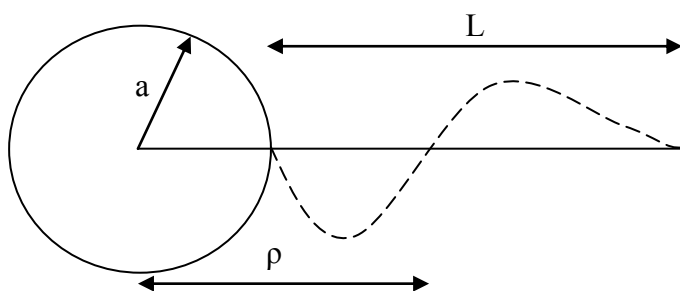


obrázek č. 2 – průběh posunů a napětí po délce svorníku

Průběh smykového napětí po délce svorníku lze vyjádřit první derivací průběhu normálového napětí, takže v místě, kde smykové napětí nabývá nulové hodnoty, normálové napětí naopak nabývá svého maxima. Dále lze pomocí druhé derivace průběhu smykového napětí určit umístění inflexních bodů průběhu normálového napětí, tato umístění jsou shodná s umístěními maximálních hodnot smykového napětí.

$$\frac{d\tau_z}{dz} = \frac{d^2\sigma_z}{dz^2} = 0 \quad [3]$$

Dále je vhodné se zmínit o umístění neutrální zóny. Pokud jsou splněny předpoklady vypsané na začátku této kapitoly (únosnost svorníku). Lze za neutrální zónu označit takové místo, kde posuny horniny a svorníku nabývají stejných hodnot (relativní posun je nulový). Z rovnic vyjadřujících posuny hornin a svorníku podél jeho délky lze po integraci dojít k následujícímu vyjádření:



$$\rho = \frac{L}{\ln(a + L) - \ln a} \quad [4]$$

obrázek č. 3 – umístění neutrální zóny svorníku

kde: ρ je vzdálenost neutrální zóny od středu díla,
 L je délka svorníku,
 a je poloměr díla.

Vyjádření neutrální zóny není však v reálné situaci funkcí pouhé geometrie díla, je závislé samozřejmě na vlastnostech okolního masivu a tomu příslušející vzdálenosti zóny vzniku plastických deformací. Analytické vyjádření neutrální zóny v různě stanovených podmínkách je detailně popsáno v publikaci [11].

Způsoby porušení svorníku

Svorník, jakožto kompozice trojice únosných elementů (tyč, tmel, hornina) ztrácí svou únosnost porušením aspoň jednoho z těchto elementů nebo na jejích hranicích (na jejích kontaktních plochách či površích), přičemž se předpokládá, že tyto kontaktní plochy jsou považovány za nejslabší články únosnosti.

Svorníky zkoušené v reálných podmínkách se převážně porušují na kontaktu mezi tmelem a horninou v závislosti na pevnosti horniny. Čím je však hornina více únosná a povrch vývrtu je více drsný (smykové parametry na kontaktu mezi tmelem a horninou jsou vyšší), může docházet k porušení na kontaktu mezi tmelem a tyčí.

Jak zjistit, na kterém povrchu nastane porušení nelze s jistotou říci. Navíc mnozí autoři předešlých výzkumů se jednoznačně ve svých tezích neshodují. V praxi je situace taková, že po závalu již nelze svorníky zkoumat. Necht' jsou tedy popsány možné způsoby porušení svorníků a jejich příčiny v laboratorních podmínkách dle Aydana [2], který nejlépe problematiku popisuje. (ocelová tyč, tmel, prstenec horniny)

Způsoby porušení lze klasifikovat jako:

- i. Porušení na kontaktu mezi tyčí a tmelem: Tento typ porušení nastává ve všech případech, pokud je tyč hladká (dnes se již nepoužívá), anebo tam, kde je prstenec tmele většího průměru (dnes omezeno BS [6]). V takovém případě element tyče a tmele ztrácí efekt spřažení.
- ii. Porušení na kontaktu mezi tmelem a horninou: Tento typ porušení nastává v opačném případě, kdy je žebírková tyč zatmelena do prstence tmele malého průměru (minimální rozměry opět omezeny BS [6]).
- iii. Porušení prstence tmele nebo okrajového materiálu (beton, hornina): Hlavní příčinou tohoto porušení bývá ztráta tahové nebo smykové pevnosti prstence tmele. Při tažení tyče dochází k radiálním posunům směrem do prstence a tím je způsobený vnitřní tlak. Pokud je vnější boční tlak působící na stěny prstence nulový, prstenec tmele nebo horniny je radiálním rozpínáním namáhán složitou kombinací tahu, tlaku a smyku, a pokud materiál toto namáhání nepřenesení, vznikají tahové trhliny. Jakmile je vnější plošný tlak vyšší jak 0,5 MPa, dochází k prvním dvěma způsobům porušení [2]. (Napětí nemá tendenci se přemísťovat na okraje vzorku, nýbrž dovnitř.)

Dále by bylo vhodné popsat možné způsoby stanovení takových parametrů svorníku, které mají na jeho únosnost značný vliv.

Tahová zkouška svorníku

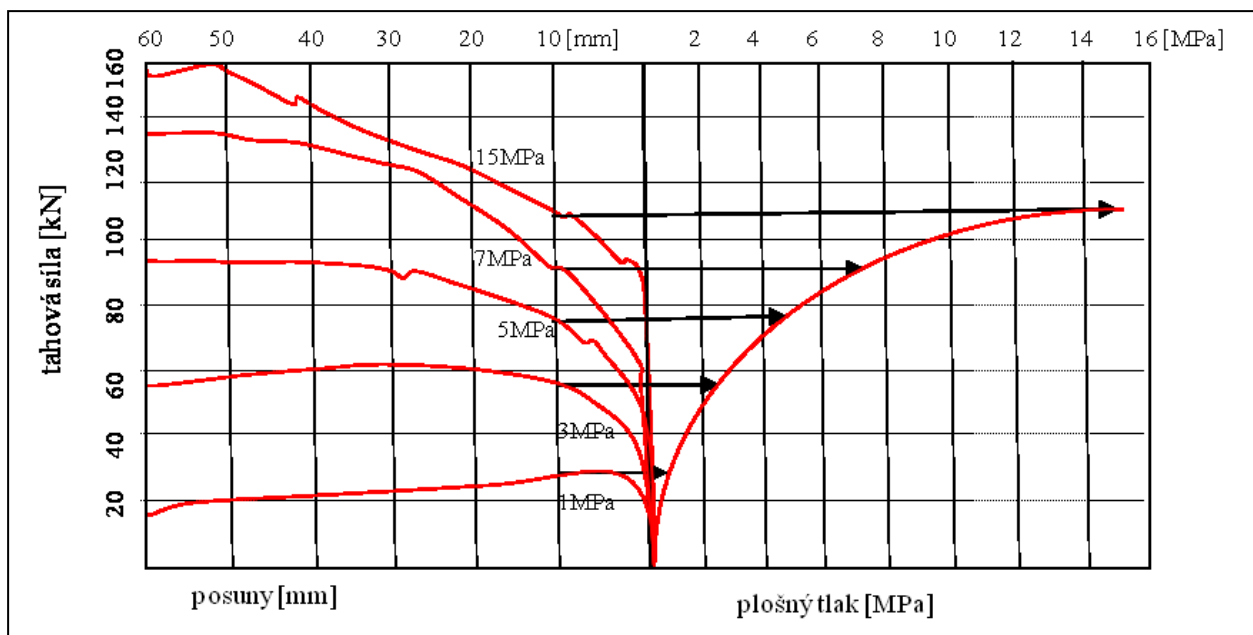
Při tahové zkoušce svorníku je určena maximální tahová síla, kterou lze svorník zatížit. Tato zkouška může být provedena v laboratoři nebo v reálných podmínkách. Tahová zkouška v reálném prostředí je ovlivněna mnoha aspekty, které mohou zkreslovat závěry. Na druhou stranu stanovuje reálnou únosnost svorníku v konkrétních podmínkách. Tlak horniny (sekundární napjatost díla) působí na stěny vývrtu a zvyšuje výslednou únosnost svorníku, diskontinuity a pórovitost horninového masivu, nedokonalý kruhový průřez vývrtu způsobený

rotačně příklepným vrtáním, které oproti kruhovému průřezu vytváří plochu podobnou průniku dvou elips vzájemně na sebe kolmých a samozřejmě má možnost špatné instalace dané stíženými podmínkami.

Při tahové zkoušce provedené v laboratoři lze oproti tahové zkoušce v reálných podmínkách pozorovat vzorek i po jeho porušení, tedy zaznamenat, na jakém povrchu k porušení došlo, popřípadě lze zaznamenávat průběh posunů na obou koncích při zatěžování. Výsledky této zkoušky jsou ale ovlivněny zidealizovanými okrajovými podmínkami. Namísto horninového masivu, který ve větších vzdálenostech dosahuje hodnot napětí blízkých původnímu geostatickému napětí, je zde použit dutý válec popřípadě kvádr betonu, simulující horninu, jehož okraje jsou ze všech stran volné. Přičemž by měly být okrajové povrchy vetknuty. Proto by měly být rozměry těchto betonových kvádrů nebo válcovitých horninových objemů takové, aby na jejich okrajích nebylo zatížení znatelné.

Triaxiální test svorníku

Další možností zjištění únosnosti svorníku je triaxiální test svorníku. Při takovém zkoušení se svorník skládá z tyče, tmele a ocelové trubky, jejímž prostřednictvím **je aplikován vnější tlak simulující sekundární napjatost horninového prostředí**. Tyč je postupně zatěžována tahem, přičemž je na stěny trubky aplikován konstantní plošný tlak. Čím je tlak vyšší, tím je vyšší i únosnost svorníku. Při tomto způsobu zkoušení se sledují průběhy posunů jak v axiálním směru, tak v radiálním směru. Na základě zjištěných posunů a jím odpovídajících vyvolaných napětí je snadné vytvořit obalovou čáru pevnosti, z jejíž tečny lze odečíst úhel vnitřního tření na kontaktu mezi tyčí a tmelem. Na svislé ose je vyznačeno smykové napětí, dáno poměrem tahové síly a průřezové plochy tyče a na vodorovné ose jsou vynášena napětí odpovídající stejným posunům. V grafu č. 3 jsou vynášeny do druhého kvadrantu tlaky, které odpovídají posunu 10mm.



graf č. 3 – vykreslení obalové čáry (převzato a upraveno z: [11])

V prvním kvadrantu jsou vykresleny křivky při tahové triaxiální zkoušce. Jsou zaznamenány posuny konce tyče s rostoucí tahovou silou. Jak již kvadrant naznačuje, čím je vyšší tlak působící na vývrt (na ocelovou trubku), tím je svorník odolnější proti vytržení.

Při představení plošného tlaku v reálných podmínkách je nutné připomenout sekundární napjatost v okolí podzemních děl. Řešení funkce napjatosti pro hodnoty napětí kruhového otvoru je vyjádřeno pro tangenciální napětí v okolí výrubu, tedy v závislosti na umístění po obvodu díla a ve vzdálenosti od obrysu díla dle vztahu [5]. Dle tohoto vyjádření je zřejmé, že tlak působící na povrch vývrtu je pro svorníky umístěné ve stropě díla ($\varphi=90^\circ$) i v boku díla ($\varphi=0^\circ$) složitou **skladbou napětí tangenciálního a napětí působícího v podélném směru díla**. Pro zjednodušení bude předpokládáno, že boční tlak se bude rovnat svislému zatížení. V tomto případě lze ze vztahu [5] vypočítat tangenciální napětí, které ve stropě díla na jeho obryse ($r=a$) nabývá hodnot $\sigma_t = -p_z$ a s rostoucí vzdáleností r od obrysu díla málo přeskočí ke kladným hodnotám, které postupně klesají až k hodnotám původního geostatického napětí p_z , a v boku díla nabývá hodnot $\sigma_t = 3p_z$, jehož průběh je s rostoucí vzdáleností od obrysu díla klesající (prof. Aldorf, strana 89 [1]). Z tohoto zjištění lze vyvodit, že pro svorníky umístěné ve stropě díla není tlak působící na stěny vývrtu zásadní, kdežto pro svorníky umístěné v boku díla je vliv tohoto tlaku možný.

$$\sigma_t = \frac{p_z}{2} \left[1 + \frac{a^2}{r^2} + \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi \right] \quad [5]$$

Rozbor kontaktu mezi tmelem a horninou

Únosnost svorníku na řešeném kontaktu je funkcí geometrie (plocha kontaktu, drsnost povrchu), pevnostních vlastností (pevnost horniny a tmele).

Síla, kterou je prstenec tmele zatížen, je dána:

$$P = \pi d L \tau_{tmele} \quad [6]$$

kde τ_{tmele} je únosnost prstence tmele proti porušení smykem a d , L je průměr a délka kontaktní plochy. Velikost τ_{tmele} je vyjádřena:

$$\tau_{tmele} = UCS_g / \alpha \quad [7]$$

kde UCS_g je pevnost v tlaku tmele α je stupeň bezpečnosti, který nabývá hodnot od 10 pro povrchovou geotechniku. Autoři [9] doporučují v báňských dílech uhlénoho hornictví hodnoty α od $\alpha = 5$ ve velmi pevných horninách do $\alpha = 10$ v málo pevných a rozvrstvených horninách.

Dále je nutné zohlednit smykovou únosnost na kontaktu mezi tmelem a horninou, neboť k porušení může docházet v hornině. Ta je stanovena dle (Kenney, 1977; Goodman, 1980; převzato z [9]):

$$\tau_{tmele-hornina} = \frac{UCS_r}{\alpha} \left(\frac{\beta}{2 \tan(45 + \varphi/2)} \right) \quad [8]$$

kde UCS_r je pevnost horniny v tlaku, stupeň bezpečnosti α nabývá hodnot od 1 pro pevnou horninu do 2 pro částečně porušenou horninu a 10 pro zcela porušenou horninu, koeficient β je v rozmezí od 0,3 pro hladký povrch vývrtu do 0,9 pro drsný povrch vývrtu, φ je úhel vnitřního tření horniny. Pevnost horniny v tlaku může být vyjádřena pomocí geomechanického parametru RMR následovně:

$$UCS_r = \sqrt{s}(UCS_{ir}), \text{ kde } s = e^{\left(\frac{RMR-105}{9}\right)} \quad [9]$$

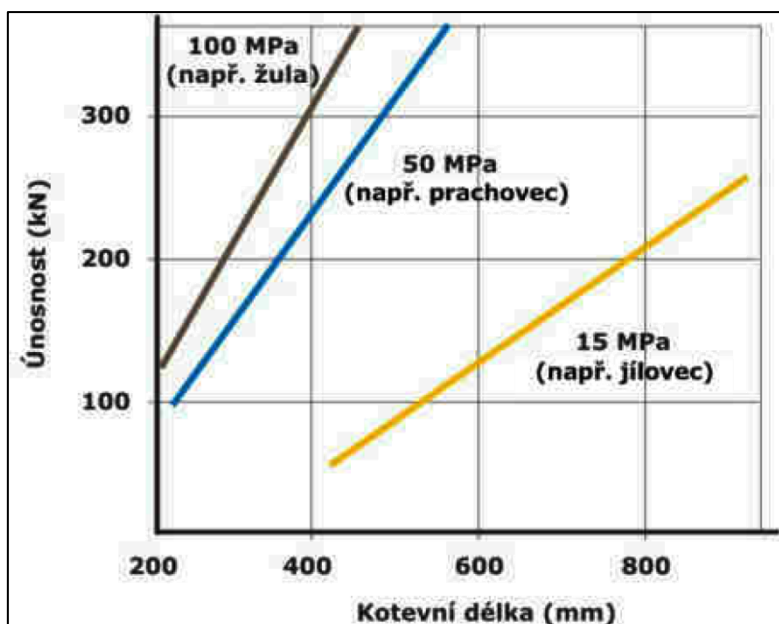
UCS_{ir} je pevnost v tlaku horniny v jejím neporušeném celistvém stavu, její reálný stav poté koeficient RMR zohledňuje.

Síla, kterou je hornina zatížena, je dána:

$$P = \pi d L \tau_{tmel-hornina} \quad [10]$$

Únosnost elementu proti vytržení je různá při každé instalaci, není zaručen plnoplošný přenos zatížení a v každé zabírce se může vyskytovat jiné prostředí, proto jsou doporučeny kontrolní zkoušky, na jejichž základě se stanoví pevnost ukotvení svorníků. Ta by měla být prováděna nejméně u 3% nově zabudovaných svorníků v nadloží a u namátkou vybraných svorníků ve vzdálenosti do 15m za čelbou. Za vyhovující lze považovat svorník, který bez vytržení vyhoví zkoušce 80kN [12] (Britská norma BS 7861:2007 doporučuje 130kN při tahové zkoušce Short Encapsulation Test).

Společnost Minova Bohemia s.r.o. ve svých prospektech [19] představuje výsledné sklony závislosti mezní síly proti vytržení na kotevní délce pro různé pevnosti okolní horniny. Z grafu lze postřehnout, že únosnost je závislá na pevnosti horniny. Bohužel není zaznamenáno, zdali opravdu došlo k vytržení na řešeném kontaktu.

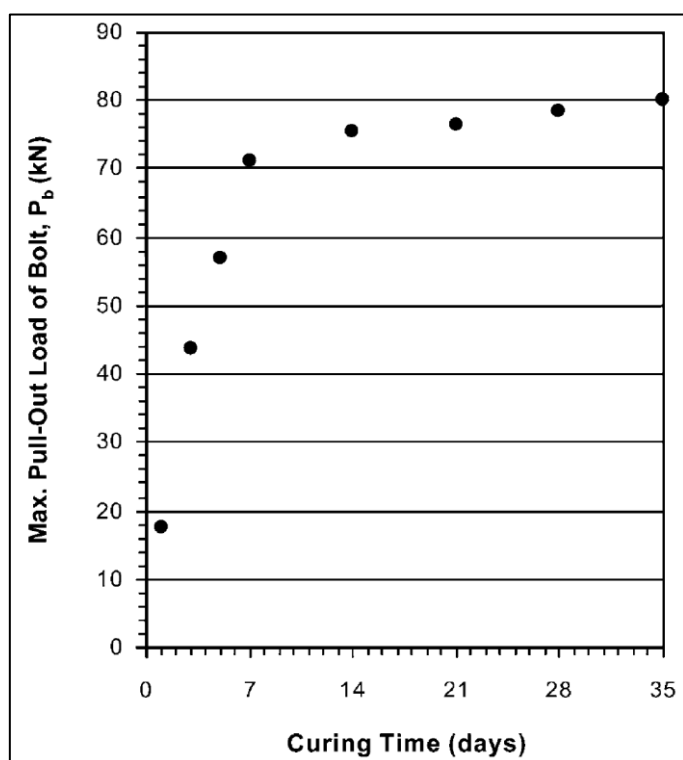


graf č. 4 – závislost mezní síly proti vytržení na kotevní délce, tmel LOKSET
(převzato z [19])

Autoři [13] taktéž zkoušeli svorníky v horninovém čedičovém prostředí, zatmelené v maltě cementové. Bohužel opět autoři neuvádějí, na kterém povrchu dochází k porušení. Necht' jsou představeny jejich závěry:

- závislost mezní síly na kořenové délce lineárně roste
- závislost mezní síly na průřezové ploše tyče lineárně roste
- závislost mezní síly na poměru vody/cementu lineárně klesá
- závislost mezní síly na pevnostních a deformačních vlastnostech tmele logaritmičtě roste (UCS, smyková pevnost tmele, modul pružnosti tmele)

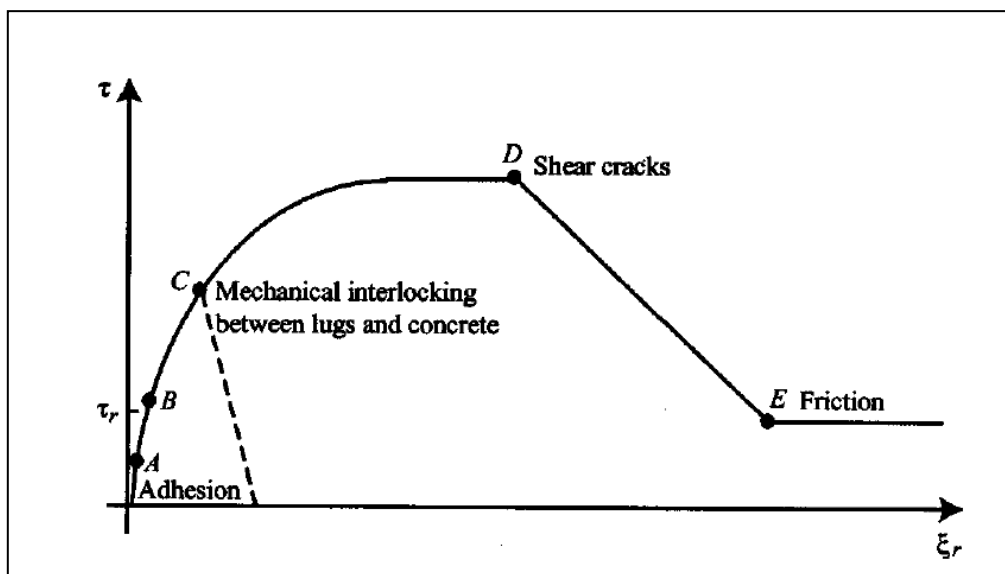
Poslední závislostí, která je zásadní pro svorníky tmelené maltou je nárůst jejich únosnosti v čase:



graf č. 5 – závislost mezní síly proti vytržení na stáří tmele (převzato z [13])

Rozbor kontaktu mezi tmelem a tyčí

Únosnost kontaktu mezi tmelem a tyčí se přisuzuje následujícím vlastnostem. Jedná se o přilnavost, soudržnost, sprážení a tření.



graf č. 6 – klasická pracovně deformační křivka při tahové zkoušce svorníku
(pozn.: nelineární počátek se vyskytuje při působícím vnějším tlaku)

Nechť jsou tyto vlastnosti podrobně vysvětleny:

Přilnavost (Adhesion)

Přilnavost je chemická vazba mezi tyčí a tmelem. Mnozí autoři se shodují v názoru, že chemická adheze nepřispívá únosnosti na řešeném kontaktu. Fuller a Cox (1975) předepisují, že chemická adheze je porušena již při relativním posunu menším než 1/5 milimetru [17]. A někteří autoři přisuzují počáteční lineární průběh spíše frikčním mechanismům než adhezním [10].

Spřažení (Interlocking)

Spřažení zvyšuje smykovou únosnost na kontaktu mezi dvěma elementy, přičemž na jejich kontaktním povrchu dochází k relativním posunům. Mechanismus spřažení mezi tyčí a tmelem zajišťují žebírka. Tato žebírka svou přítomností vyvolávají koncentraci napětí, která způsobují vznik trhlin v prstenci tmele v těsné blízkosti na řešeném kontaktu, tyto trhliny se dále šíří směrem od tyče až k okrajovému povrchu tmele s horninou.

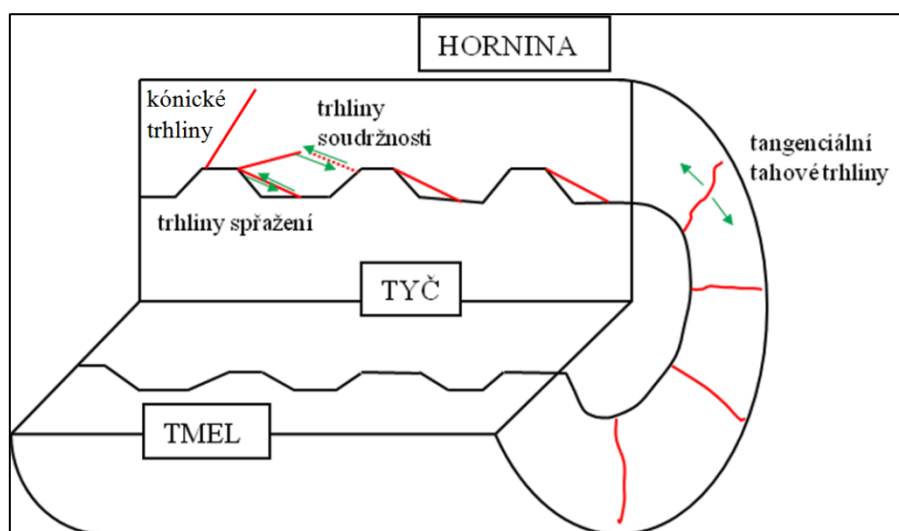
Tření (Friction)

Vznik trhlin je v pracovně deformační charakteristice svorníku významný klesajícím charakterem křivky z její vrcholové smykové pevnosti. Jakmile jsou trhliny propojeny,

smyková pevnost setrvává na residuální zbytkové úrovni, a celý systém je v této rovině závislý pouze na tření mezi vzniklými trhlinami a kontaktními povrchy (při konstantním působení vnějšího tlaku).

Trhliny v těsné blízkosti kontaktu mezi tmelem a tyčí

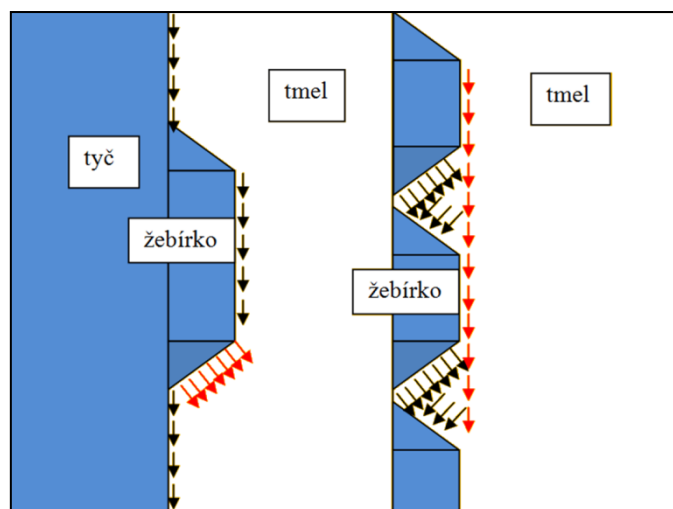
Podél svorníku vznikají čtyři druhy trhlin, pojmenované jako trhliny soudržnosti (funkcí smykových parametrů tmele), trhliny spřažení (funkcí geometrie žebírek) a tahové tangenciální trhliny s kónickými trhlinami, jejichž vznik je přisuzován tahovému napětí. (obrázek č. 4)



obrázek č. 4 – trhliny v těsné blízkosti kontaktu mezi tmelem a tyčí

Trhliny soudržnosti

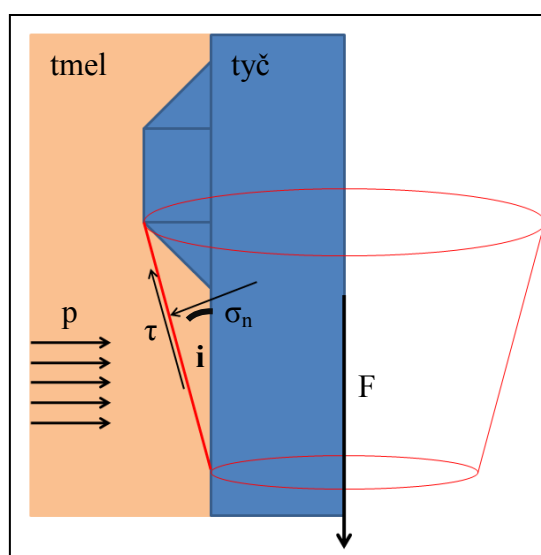
Trhliny soudržnosti lze charakterizovat povrchem válce, jehož průměr je dán průměrem tyče včetně výšky žebírek. Tato smyková plocha, podél které dochází k porušení, vzniká u tyčí s hladkým povrchem. V tomto případě lze za soudržnost považovat takovou hodnotu, která odpovídá síle při usmyknutí podělené povrchem tyče. Trhliny soudržnosti jsou významné i u tyčí, jejichž žebírka jsou v těsné vzdálenosti (např. závitová tyč). Vzdálenost žebírek nedovoluje tlakovému namáhání v jeho přenosu do tmelu, nýbrž je zpětně přenášen do sousedícího žebírka, a tmel, jenž je mezi těmito závitovými, se oddělí od zbytku tmelu. Tímto způsobem, ztrátou soudržnosti (smykové pevnosti) reaguje při využití minimální potenciální energie. Na obrázku číslo 5 jsou zásadní namáhání pro žebírkovou tyč a pro závitovou tyč označena červeně.



obrázek č. 5 – namáhání v blízkosti kontaktu tmele a tyče pro žebírkovou tyč (vlevo) a pro tyč opatřenou závitem (vpravo)

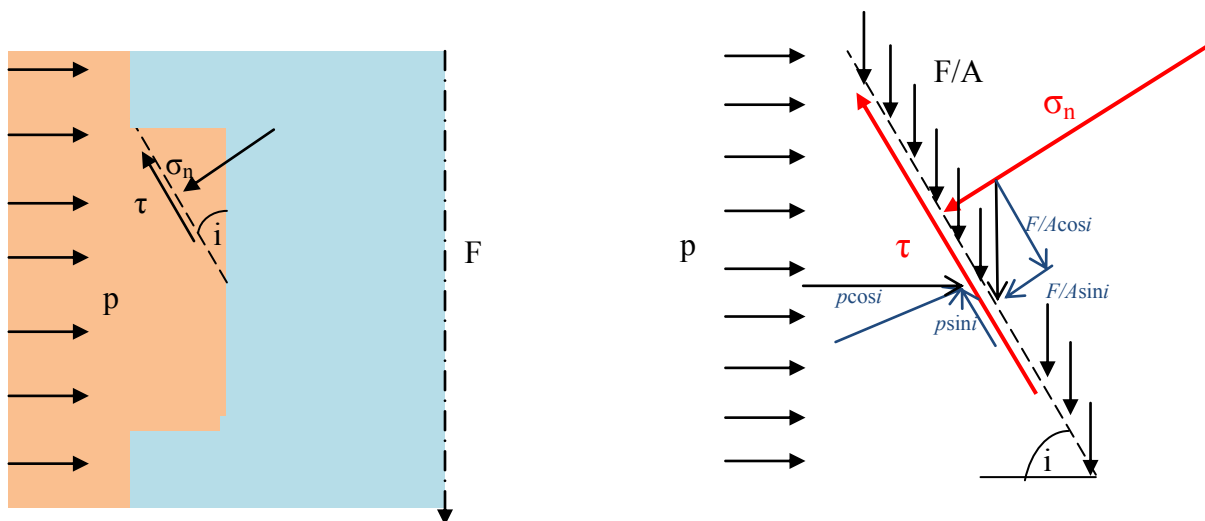
Trhliny spřažení

Trhliny spřažení vznikají v prostoru mezi žebry. Pod jakým úhlem se smyková plocha projeví je dáno geometrií žebírek, pevnostními vlastnostmi tmele a adhezními vlastnostmi na kontaktu mezi tyčí a tmelem. Autoři [7] představují analýzu vzniku smykové plochy dle Mohr-Coulombového kritéria porušení:



obrázek č. 6 – silové působení trhliny spřažení

Jakmile hodnota smykového napětí dosáhne kritické hodnoty, nastane posun prstence tmele podél kuželovité smykové plochy. V tomto momentu je převršena čára smykové pevnosti a chování není pružné nýbrž plastické.



obrázek č. 7 - silové působení na smykové ploše trhliny sprážení

Před mobilizací mikrotrhlin tmele, před vznikem smykové kuželovité plochy, působí na soustavu svorníků napětí p , které je radiálním tlakem svorníků a síla F způsobená tažením svorníků. Toto silové působení lze v primárním stavu přenést do souřadnic předpokládané smykové plochy následovně:

$$\tau = \frac{F}{A} \cos i - p \sin i \quad [11]$$

$$\sigma_n = p \cos i - \frac{F}{A} \sin i \quad [12]$$

kde:

A je povrch kuželovité smykové plochy, na které se vzorek poruší

$$A = \pi(R^2 - r^2) / \sin i$$

i je úhel, který svírá smyková plocha od osy tyče

σ_n je normálové napětí na řešené oblasti

τ je smykové napětí na řešené oblasti

Pro analýzu určení mezí úhlu smykové plochy je třeba také vyjádřit síly působící na potenciální smykové ploše pomocí složek působících sil na soustavu svorníků, a tedy:

$$\frac{F}{A} = \sigma_n \sin i + \tau \cos i \quad [13]$$

$$p = \sigma_n \cos i - \tau \sin i \quad [14]$$

Smykové napětí na řešené oblasti lze zapsat ve tvaru:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad [15]$$

Po vyjádření radiálního napětí působícího na svorník pomocí normálového a smykového napětí na potenciální smykové ploše vychází tvar:

$$p = \sigma_n \cos i - (c + \sigma_n \cdot \tan \varphi) \sin i \quad [16]$$

dále nabývá-li radiální napětí pozitivních hodnot (tlak):

$$\sigma_n \cos i - (c + \sigma_n \cdot \tan \varphi) \sin i \geq 0 \quad [17]$$

Je-li soudržnost na kontaktu prut tmel zanedbána, pak tedy:

$$\begin{aligned} \sigma_n \cos i - (c + \sigma_n \cdot \tan \varphi) \sin i &\geq 0 \\ \sigma_n \cos i - c \cdot \sin i - \sigma_n \cdot \tan \varphi \cdot \sin i &\geq 0 \\ \sigma_n (\cos i - \tan \varphi \cdot \sin i) &\geq 0 \\ \cos i - \tan \varphi \cdot \sin i &\geq 0 \\ \cot gi &\geq \tan \varphi \\ \frac{1}{\tan i} &\geq \tan \varphi \\ \tan \varphi &\leq \frac{1}{\tan i} \end{aligned} \quad [18]$$

Z nerovnice je zřetelná závislost velikosti úhlu smykové plochy na úhlu vnitřního tření tmele pro případ, kdy je soudržnost na kontaktu mezi tmelem a prutem zanedbaná.

Z této nerovnice je sestrojena tabulka závislosti úhlu smykové plochy na úhlu vnitřního tření tmele.

φ [°]	90	80	70	60	50	45	40	30	20	10
i [°]	0	10	20	30	40	45	50	60	70	80
$tg \varphi$	-	5,67	2,75	1,73	1,19	1	0,84	0,58	0,36	0,18
$cotg i$	0	0,18	0,36	0,58	0,84	1	1,19	1,73	2,75	5,67

tabulka č. 1 – závislost úhlu smykové plochy na úhlu vnitřního tření tmele

Z tabulky č. 1 vyplývají krajní meze pro splnění podmínky $tg\varphi \leq cotgi$, a pokud:

$\varphi + i = \pi$, pak tedy pro $c=0$ a $p=0$ bude úhel smykové plochy nabývat hodnot $i \leq \pi - \varphi$.

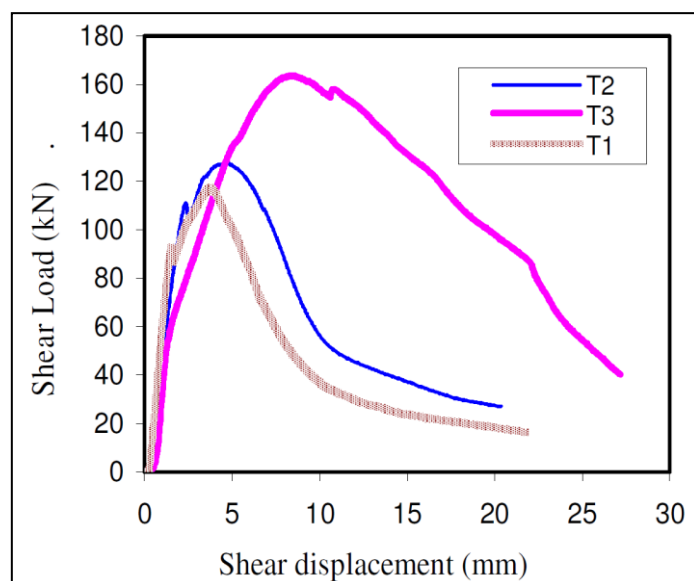
Například pokud úhel vnitřního tření tmele bude 35° , pak úhel smykové plochy od roviny tyče bude minimálně 55° .

Z výše popsaného vyplývá, že úklon smykové plochy je zcela nezávislý na úklonu boční stěny žebírek. Úhel, pod kterým vzniká smyková plocha je závislý na smykových parametrech tmele, na výšce žebírek a na silovém působení na smykové ploše. Na únosnost svorníků má značný vliv i vzdálenost žebírek. I když by se zdálo, že čím jsou žebírka blíže k sobě, tím bude smyková únosnost vyšší, tak autoři [3] dokazují opak. Necht' jsou představeny výsledky laboratorních zkoušek tahových zkoušek ocelových tyčí o různých profilech při krátkých kořenových délkách 75 mm.

Parametry tyčí byly následující:

parametry	výška žebírek [mm]	vzdálenost žebírek [mm]	maximální tahová síla [mm]	maximální posun [mm]	smyková únosnost [MPa]
T1	0,75	11	114,8	4,1	22,2
T2	1,35	12	131,7	4,51	25,4
T3	1,2	25	160	8,2	31

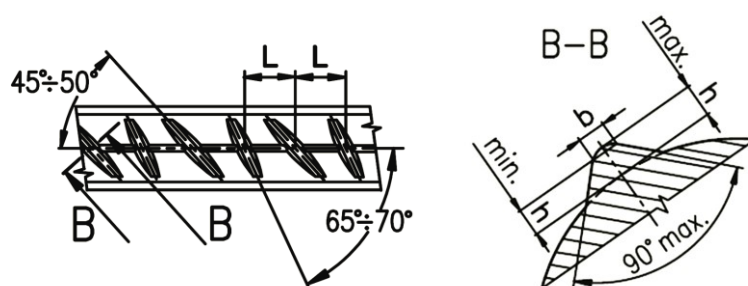
tabulka č. 2 – parametry ocelových tyčí T1, T2, T3 [3]



graf č. 7 – pracovně deformační charakteristiky svorníku o různých profilech [3]

Z grafu č. 7 lze jednoznačně přičíst nejvyšší únosnost tyči T3, přičemž žebírka této tyče nejsou nejvyšší. Jejich vzdálenost 25mm je však markantní oproti zbylým dvěma tyčím. A nejedná se o jediný test, který by závislost mezní síly proti vytržení na rozteči žebírek dokazoval. Dalším testováním se autoři zabývali v [4], kde nejvyšší únosnost byla přisouzena opět tyči s žebírky 25 mm od sebe vzdálených.

Další vlastností, která velice ovlivňuje vznik trhlin spřažení, je sklon žebírek. V praktické části této práce se laboratorní zkouškou ukázalo, že žebírka s menším sklonem (ideálně ve směru kolmém na osu tyče) vyvolávají větší odpor proti posunům, tedy tyč v tmelu neprokluzuje.



obrázek č. 8 – geometrie žebírek ocelové tyče R

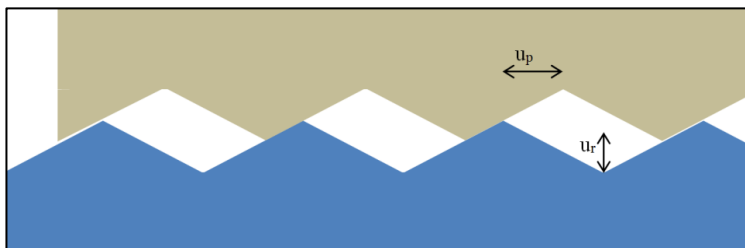
Čistota povrchu tyče je také zásadní. I když byla v dřívějším textu považována adheze za minimální či zanedbatelnou, její vliv je na vznik trhlin spřažení zásadní. Pokud není tyč

očištěna, nevzniknou molekulární vazby na kontaktním povrchu a trhliny spřažení se vůbec neprojeví. Prakticky je vliv očištění povrchu dokázán na laboratorní zkoušce, kdy byly provedeny tahové zkoušky svorníku dvojího typu tyčí, očištěné – nové tyče a zašpiněné – tyče staré. Tmel na staré tyči setrval ve velmi malé míře oproti čisté nové tyči.

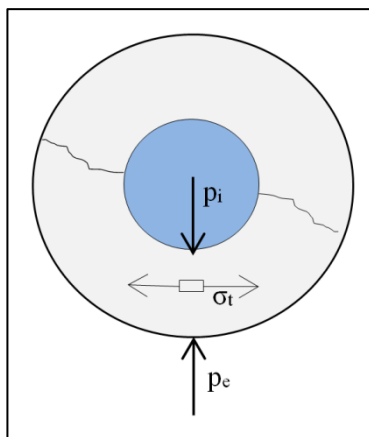
Trhliny spřažení hrají v únosnosti svorníku velikou roli, neboť tmel setrvávající na tyči se sune s tyčí a relativně se posouvá se sousedícím tmelem, přičemž se smyká po smykové ploše a vyvolává tření na plochách těchto trhlín. V takové situaci tmel setrvávající na tyči tlačí na okolní prstenec tmele (zevnitř) jak ve směru podélném (tahem tyče), tak i ve směru radiálním (radiální posuny), přičemž radiální posuny bývají řádově miliontinou až tisícinou axiálních posunů (posunů podélně s tyčí). Radiální posuny jsou vzhledem k tuhosti systému kolmo na svorník významné, neboť v tomto směru není svorník ještě porušen. V podélném směru je svorník porušen na kontaktní ploše trhlinami spřažení, které dovolují uvolnit napětí třením na kontaktních plochách těchto trhlín. V radiálním směru naopak napětí roste a tím dává příčinu pro vznik nového systému trhlín.

Tangenciální trhliny

Při tahu tyče vznikají v jejím bezprostředním okolí relativní posuny. (obrázek č. 9) Tyto posuny vyvolávají vnitřní tlak p_i působící na prstenec tmele zevnitř. Zároveň je prstenec tmele namáhán vnějším tlakem p_e působícím na stěny vývrtu, který eliminuje radiální posuny. Pokud je zanedbáno rozptýlení napětí v podélném směru tyče, lze očekávat, že prstenec tmele bude nejvíce namáhán tangenciálním napětím, které je funkcí deformačních charakteristik tmele a geometrií celého systému v řezu. (obrázek č. 10) Radiální napětí v průběhu šíření trhliny klesá až na hodnotu nula. Jakmile tangenciální napětí dosáhne hodnot tahové pevnosti tmele, vzniknou tahové tangenciální trhliny, které mohou svou vzdáleností dosahovat až ke stěnám vývrtu.



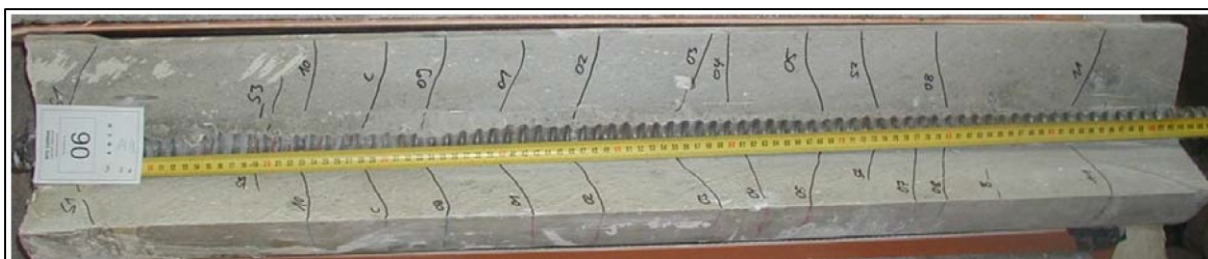
obrázek č. 9 – posuny tmele v těsné blízkosti kontaktu mezi tmelem a tyčí
(převzato a upraveno z [2])



obrázek č. 10 – tangenciální trhlina v prstenci tmele
jako důsledek tangenciálního tahového napětí

Kónické trhliny

Kónické trhliny jsou úzce spjaty s trhlinami tangenciálními. Jejich vztah je dán složitým mechanismem, který není v literatuře vysvětlen. Z obrázku č. 10 a 11 lze však vyvodit, že při nulovém vnějším tlaku se tahem tyče vyvolá jiný tvar smykové plochy, který se podobá kuželu. Pokud není na prstenec tmele aplikován vnější tlak, napětí v prstenci tmele má tendenci se roznášet do směru tahu tyče. Tímto se trhlina stává reakcí tmele na složitou kombinaci tahových, tlakových a smykových namáhání. Kónická smyková plocha se objevuje především v tmelech s nízkým modulem pružnosti. Úhel, který svírá trhlina od horizontální roviny, se pohybuje v rozmezí 60° až 80° [2].



obrázek č. 11 – kónické trhliny vzniklé tahem tyče z obou stran bez aplikace vnějšího tlaku
převzato z [8]

Praktická část

Praktická část diplomové práce se soustřeďuje na ztrátu únosnosti svorníku na kontaktu mezi tmelem a tyčí.

Laboratorní zkouška

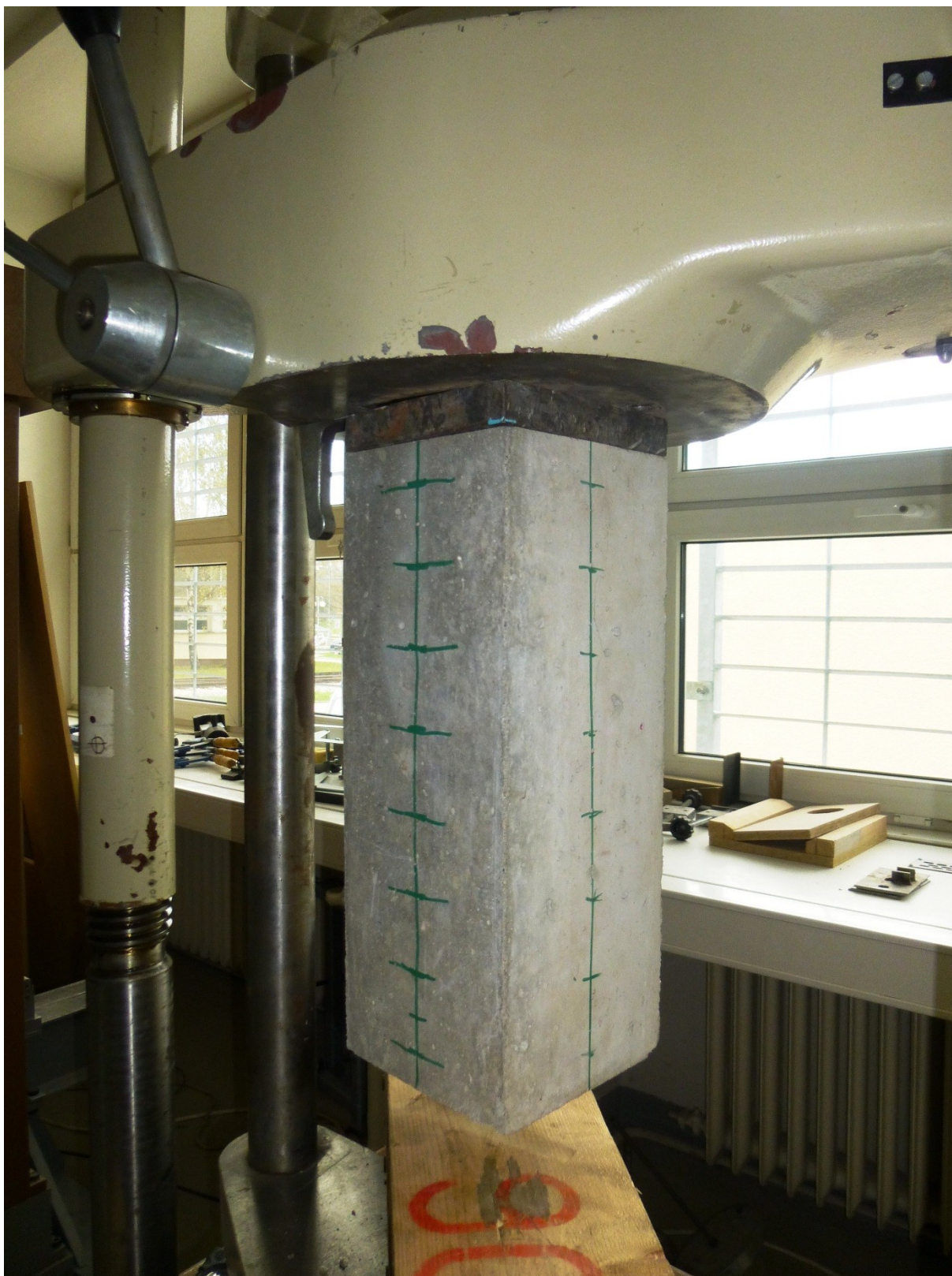
Byla provedena laboratorní zkouška – tahová zkouška svorníku, na jejímž základě byla stanovena pracovní deformací křivka svorníku. Model svorníku se skládal z:

- ocelová žebírková tyč R, jmenovitého průřezu 20mm, oceli třídy B500B, délky 700mm
- malta cementová o pevnosti v tlaku po sedmi dnech 51,7MPa, pevnosti v tahu 6,99 MPa, modulu pružnosti 25 GPa, prstenec tmele o velikosti vnějšího průměru 35mm, vnitřního 20mm
- beton třídy B20/25, trámec 150x150mm, dvojí výšky 400 a 200mm do kterých byly vyvrtány vrty průměru 35mm

Vzorky byly, po sedmi dnech tuhnutí malty, vloženy do tahacího přístroje. Tyč byla uchopena čelistmi a prostřednictvím přenášečí desky s otvorem byla tyč vytahována z prstence tmele.

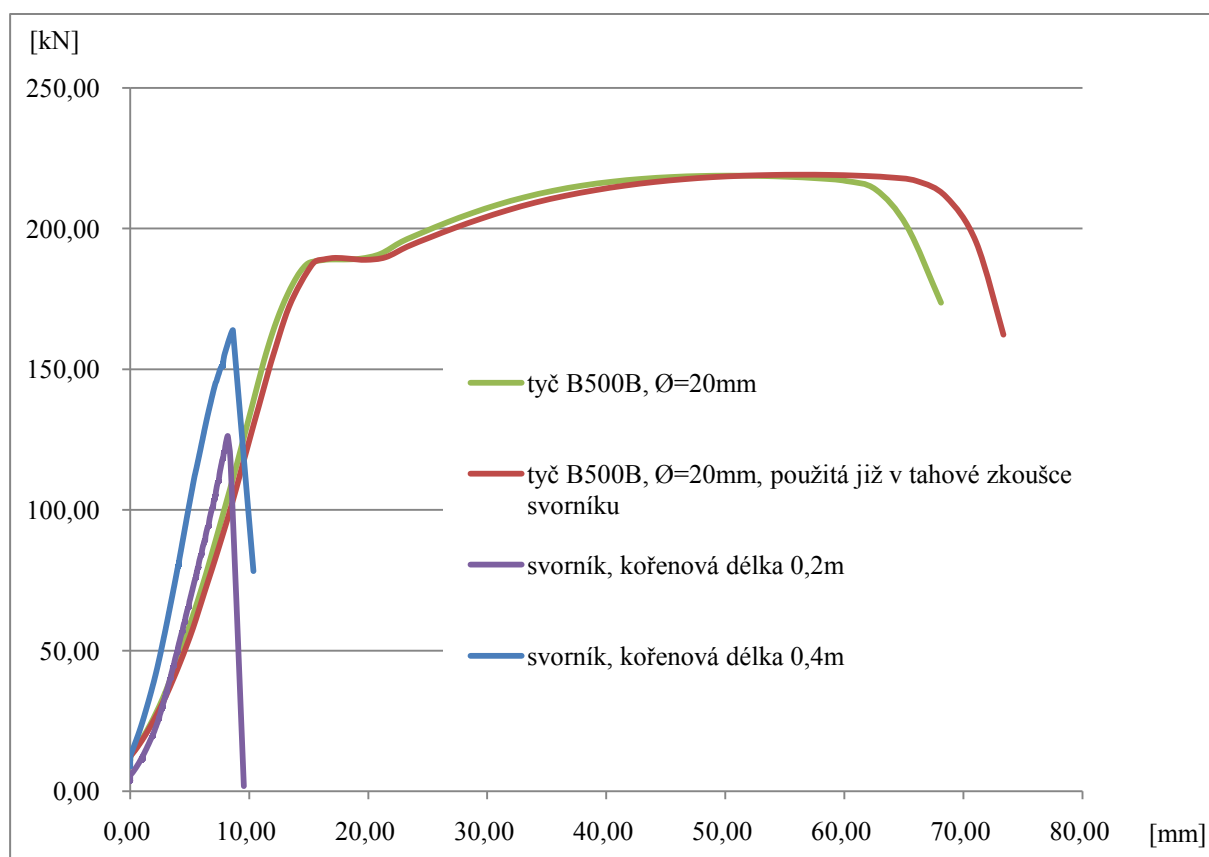


obrázek č. 12 – laboratorní vzorek svorníku o kořenové délce 400mm a 200mm



obrázek č. 13 – laboratorní svorník uchycený v čelistech tahacího stroje

Betonové trávce byly po celé výšce provrtány vrtací technikou pro jádrové vrtání do betonu, aby mohly být zaznamenávány posuny konce tyče. Analogové indikátorové hodinky zaznamenávaly posuny v setinách milimetrů a rychlost nárůstu tahové síly činil 0,5 kN/s. V grafu č. 8 jsou vykresleny pracovní deformační křivky dvou laboratorních vzorků svorníků pracovní deformačních křivek samotných tyčí jmenovitého průřezu 20mm. Graf č. 9 je výpis stejných závislostí ovšem v pružné oblasti namáhání tyčí, včetně průběhu posunů konce tyče. Zde se musí poznamenat, že do velikosti síly 50kN tyto posuny rostly až na hodnotu 0,13mm, poté je předpokládáno, že narůstaly řádově v tisícinách milimetru, neboť indikátorové hodinky ukazovaly konstantní hodnotu. Koncový posun tyče po dosažení maximální únosnosti na kontaktu prut-tmel byl 5,06mm.

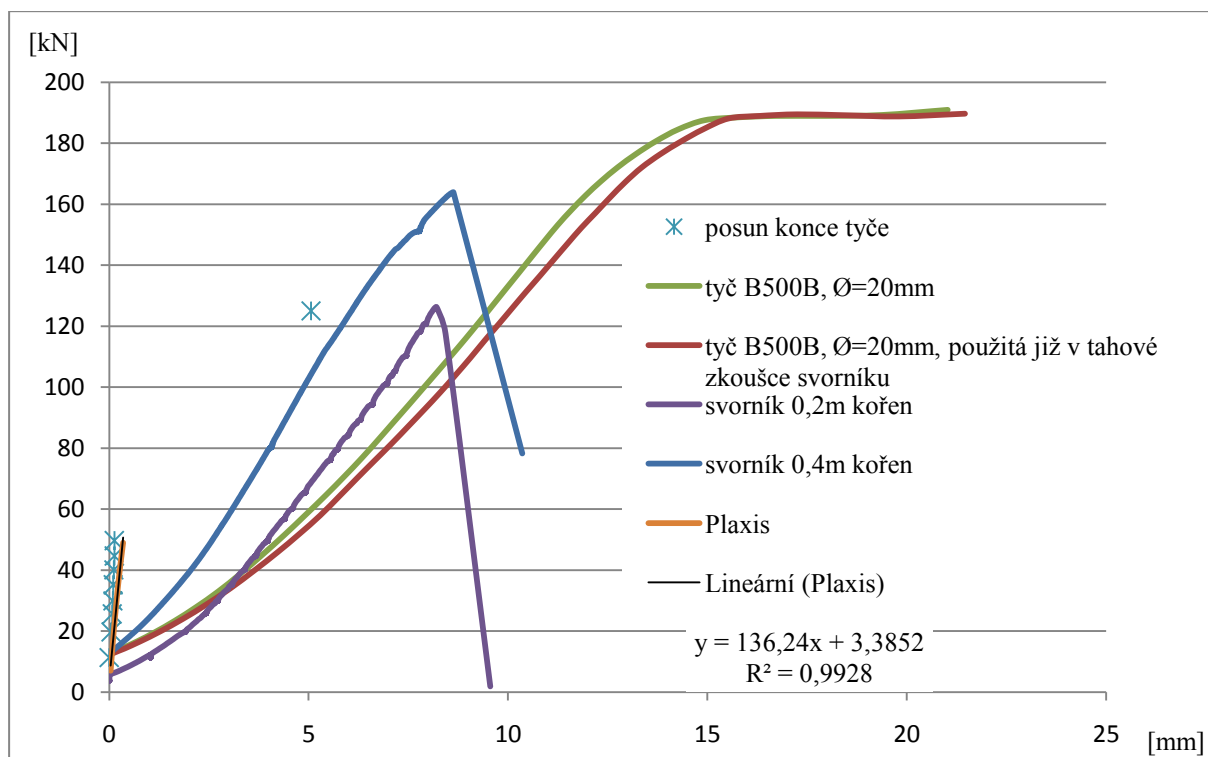


graf č. 8 – pracovní deformační křivky svorníku dvou kořenových délek, ocelové tyče nové a tyče již odzkoušené při zkoušce svorníku

Zkouška probíhala plynule s velmi malým nárůstem posunů konce tyče dosahujících hodnot 0,13mm při síle 50 kN. Při této síle dosahovaly posuny čelistí hodnot 3,94 mm a volná délka tyče dle Hookova zákona se prodloužila o 0,23 mm. Zbytek posunů 3,58mm je přisuzován

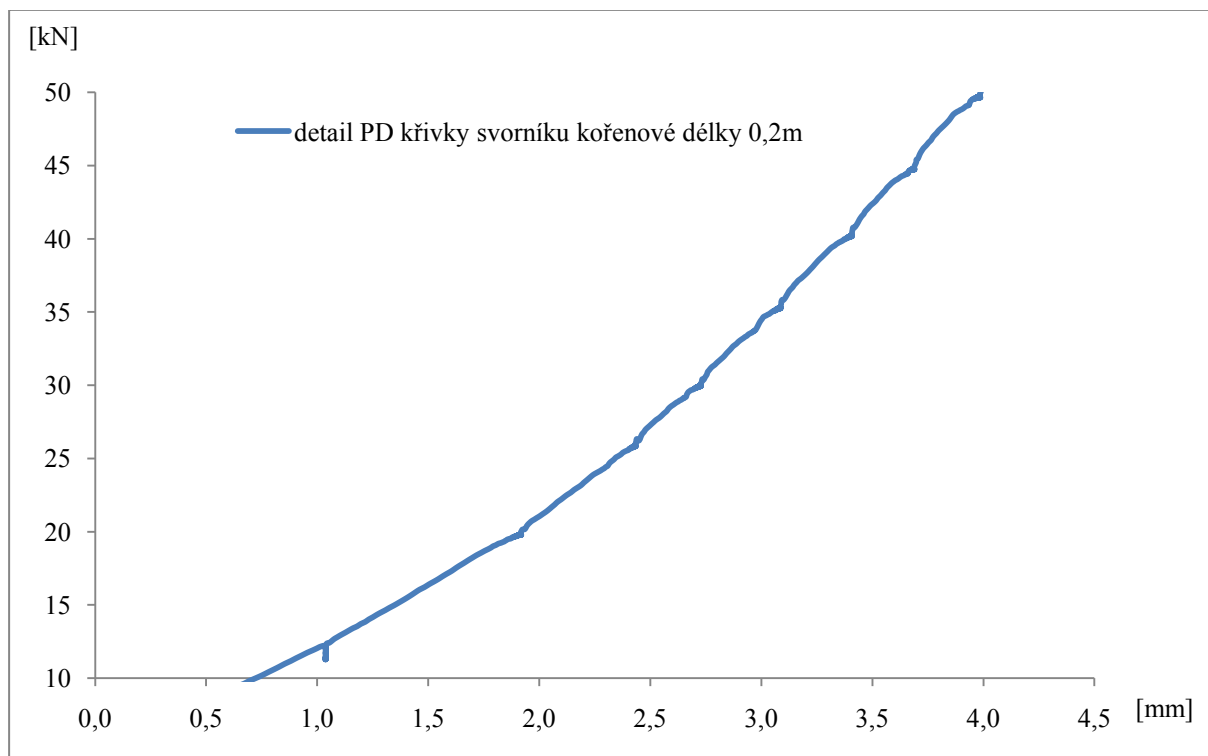
dosedáním tyče do prstence tmele a porušením kolem řešeného kontaktu. V grafu č. 10 je detail pracovně deformační charakteristiky krátkého svorníku. Z grafu lze poznat, že v různých intervalech, jejichž frekvence se s rostoucí silou zvyšuje, dochází ke skokům jinak spojitého průběhu. Tyto skoky zvyšují tuhost v prvotní části grafu (do cca 50 – 80 kN pro krátký a dlouhý svorník respektive) a naopak ji snižují ve zbylé části křivky, lze zde tedy zaznamenat určitý konvexní versus konkávní charakter. (graf č. 9) Konvexe je přisuzována dolehnutím tyče a jejím opřením se do tmelu. Její jinak relativní pružný charakter oproti relativně tuhému prostředí je zde omezován. Naopak konkáva, jež je zde promítnuta snížením úhlu od horizontály, tedy naopak poklesem modulu pružnosti, je výsledkem vzniku primárních trhlin a smykání, které samozřejmě výslednou tuhost snižují.

Dalším komentářem k přiloženým grafům je poměr mezi mezní silou dlouhého a krátkého svorníku. Laboratorní zkouška je všeobecně zkreslena špatně simulovanými okrajovými podmínkami, ale přesto naznačuje, že smyková únosnost nemůže být stanovena na základě síly podělené příslušným povrchem kořene. Poměr mezních sil při porušení krátkého a dlouhého svorníku je 1,33, kdežto poměr jejich délek je 2. Mohou být však stanoveny smykové únosnosti kořene spolu s významnou tuhostí kořene proti vytržení na jeden metr délky pro určitý lepený svorník o určitém tmelu a tyči pro určité prostředí.



graf č. 9 – pracovně deformační křivky (ocel B500B pouze do meze kluzu)

British standards [6] doporučují minimální hodnoty mezní síly proti vytržení a stanovení minimální tuhosti systému, chybějícím faktorem je však stanovení sklonu křivky závislosti mezní síly proti vytržení na kořenové délce. Pokud jsou k dispozici dvě tahové zkoušky o různých délkách kořene ve stejném prostředí, lze dopočítat, při jaké minimální kořenové délce by tyč byla namáhána plasticky.



graf č. 10 – detail pracovně deformační křivky krátkého svorníku

Jelikož vazba byla porušena při mezních silách 125 a 165 kN pro krátký a dlouhý svorník respektive, což odpovídá pružné fázi zatěžování tyče, teoreticky lze vyhodnotit, že tyč nebyla v žádném místě zplastizována.



obrázek č. 14 – pohled na prstenec tmele po zkoušce

Na základě tahových zkoušek v reálných podmínkách [13], kdy autoři zjišťovali závislost mezní síly proti vytržení na kořenové délce, lze zjednodušit jejich tvrzení, že mezní síla proti vytržení je přímoúměrná kořenové délce. Nárůst mezní síly je lineární, avšak v různých podmínkách je sklon této závislosti různý. Na základě dvou známých hodnot mezních sil, lze extrapolací zjistit, jakou minimální kořenovou délku by svorník musel mít, aby byla ocelová tyč namáhána za mezí kluzu. Je-li hodnota síly na mezi kluzu tyče odečtena 190kN, hodnota mezní síly proti vytržení při kořenové délce 0,4m 165kN a hodnota mezní síly proti vytržení při kořenové délce 0,2m 125kN, pak extrapolací dle jednoduché funkce:

$$\text{délka} = 0,005 \times \text{síla na mezi kluzu} - 0,425$$

je minimální kořenová délka při namáhání tyče za mezí kluzu 0,525m.

Pro prokázání byla tyč znovu namáhána do meze porušení a její pracovně deformační charakteristika je vykreslena v grafu č. 8 a 9 spolu s pracovně deformační charakteristikou nové tyče stejné třídy oceli a průřezu.

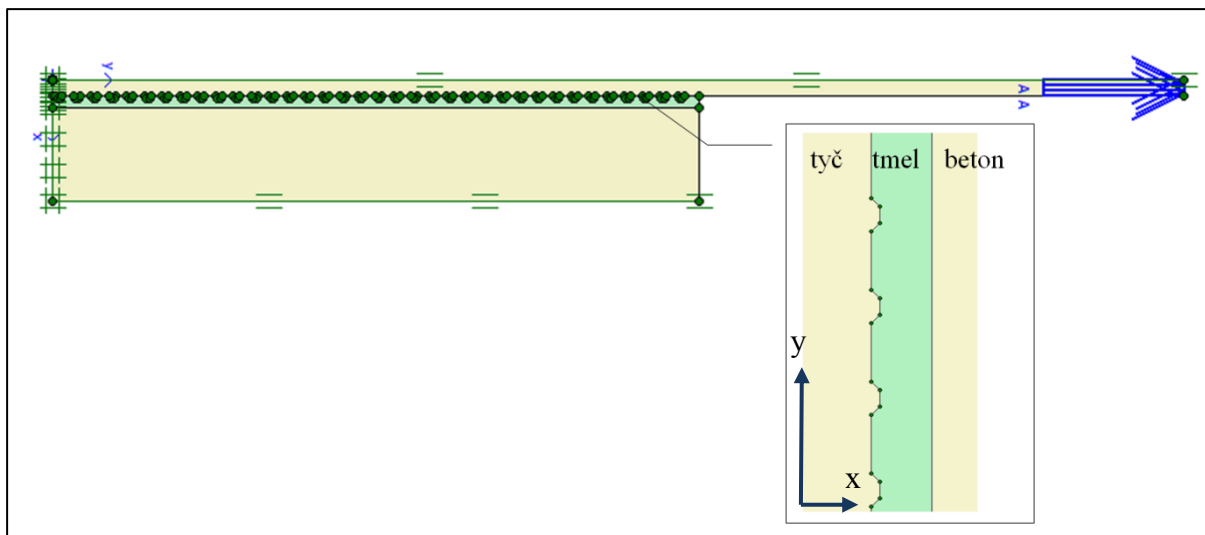


obrázek č. 15 – tmel setrvávající na tyči, jakožto důsledek trhlin spřažení
(tmel nelze ručně odstranit; tmel byl odstraněn až po uskutečnění opětovné zkoušky tyče na tah z důvodu vyšších relativních přetvoření na kontaktu než těch při tahu tyče z kořene svorníku)

Modelování tahové zkoušky pomocí MKP

Plaxis 2D

V softwaru Plaxis 2D byla namodelována laboratorní zkouška svorníku v axisymetrické úloze. Tyč zde není zadána jako výztužný element plate ani anchor, ale je definována systémem soil, tedy zeminou o materiálových vlastnostech oceli. Materiálový model byl zvolen linear-elastic. Zbylé prostředí tmel a beton jsou již zadány materiálovým modelem Mohr-Coulomb. Okrajové podmínky musí být voleny s ohledem na směr gravitace, který je veden ve směru osy y. Proto musí být model uchopen do tuhé vany, i když ve skutečnosti dno visí ve vzduchu.



obrázek č. 16 – geometrie modelu v Plaxis 2D

Na tyč bylo aplikováno plošné zatížení o maximální hodnotě 170 kPa. Při vyšším zatížení docházelo k překročení Mohrovy-Coulombovy podmínky porušení a výpočet nebyl dokončen. Aby bylo možné vykreslit pracovní deformální křivku modelu svorníku, byla použita β metoda [5], která v dané fázi aplikuje pouze určitý podíl zadaného zatížení. Bylo definováno celkem 10 fází výpočtu, každá obsahovala přírůstek zatížení 10% z celkové hodnoty zatížení 220kPa. Osm z deseti fází bylo vypočteno.

Sledovanými parametry byly:

- vertikální posuny, rovnice posunů v kořenové délce svorníku (podélné posuny, posuny v ose y)
- čerpání smykové pevnosti
- směry přetváření tmele v okolí kontaktu mezi tyčí a tmelem

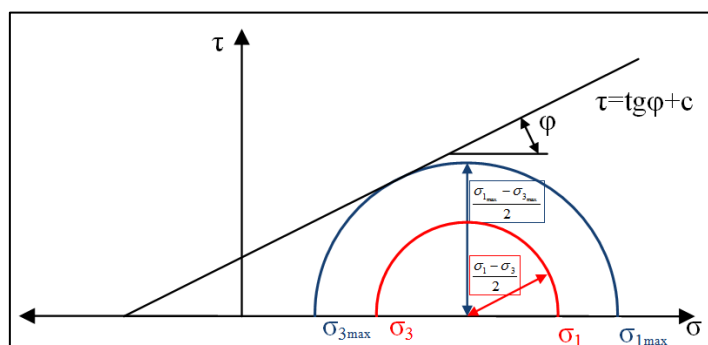
Dalším parametrem zájmu byly horizontální posuny na řešeném kontaktu. (radiální posuny, posuny v ose x, kolmo na tyč). Jedná se však o kontinuální síť konečných prvků, která nedovoluje reálně simulovat potřebné podmínky na kontaktním povrchu. Za prvé, posuny uzlů sítě na kontaktním povrchu mezi tmelem a tyčí přisuzují těmto prvkům stejné hodnoty posunů a přetvoření. V reálné situaci dochází k částečnému porušení anebo k usmyknutí žebírek od tmele, tyč je mnohem pružnější než tmel, v tmelu tedy po dosažení určité meze přetvoření nakonec musí dojít k seskupení mikrotrhlinek a poté makrotrhlinek uspořádaných podél smykové plochy. Za druhé, tyč je tahem zužována,

jedná se o jednoduchý Poissonův efekt, avšak v reálné situaci po usmyknutí v těsném kontaktu mezi tyčí a tmelem dochází k relativním posunům, které tlačí tmel směrem od tyče a záporné poměrné přetvoření tyče v rovině kolmo na tyč (zúžení) v reálné situaci nijak neohrožuje vznik tlaku do tmele.

Čerpání smykové pevnosti a plastické body

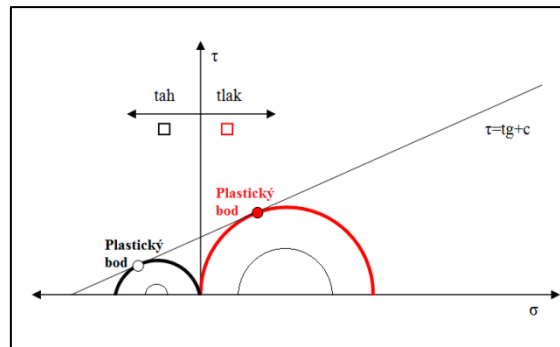
Čerpání smykové pevnosti RSS (Relative Shear Shadings) je vyjádřeno Mohr - Coulombovým kritériem porušení. RSS značí poměr mezi poloměrem Mohrovy kružnice r řešeného elementu generované sítě s poloměrem Mohrovy kružnice, která se dotýká Mohrovy obálky r_{max} , jak je znázorněno na obrázku č. 17.

$$RSS = \frac{r}{r_{max}} = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_{1max} - \sigma_{3max}}{2}} \quad [19]$$



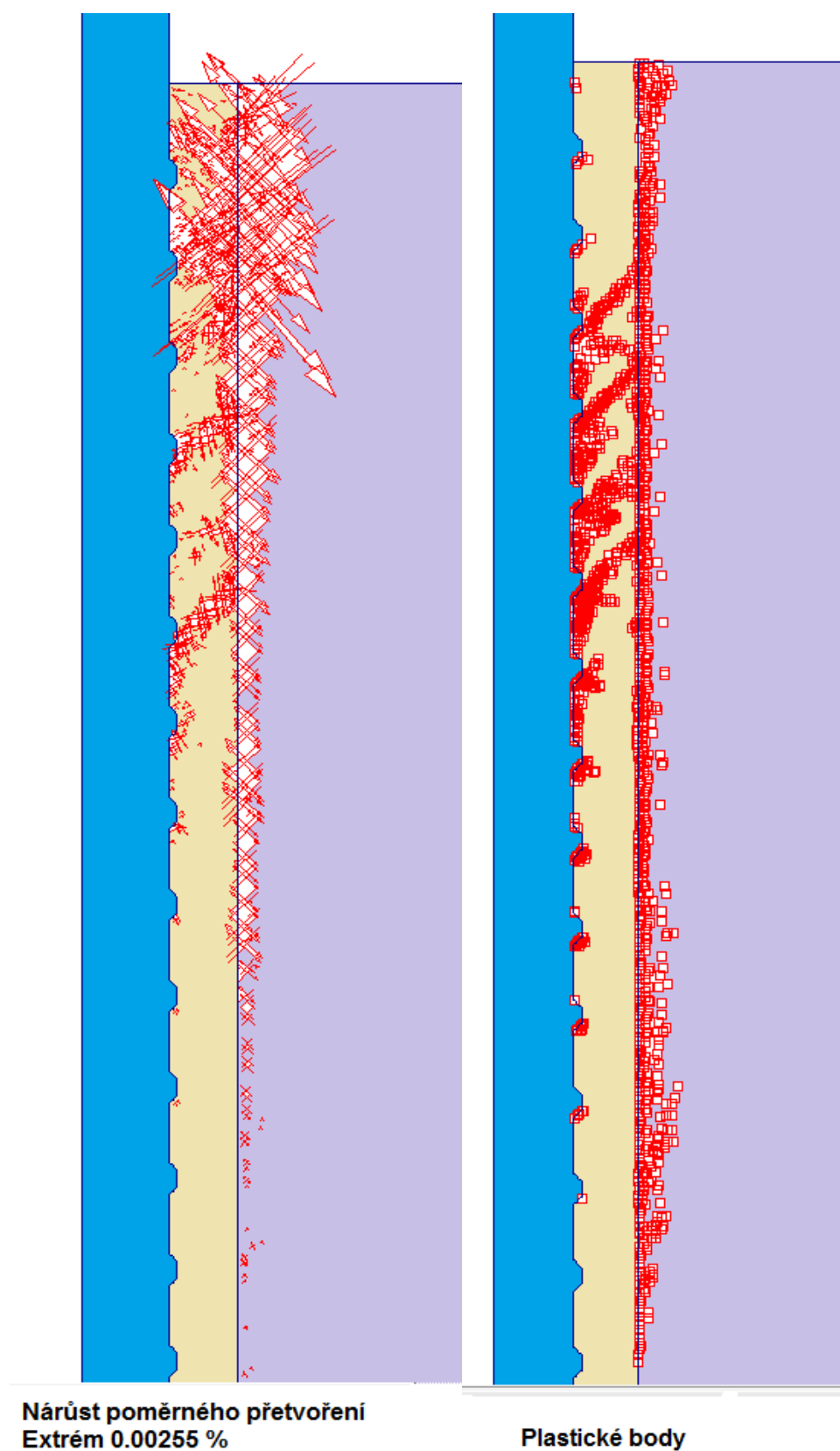
obrázek č. 17 – čerpání smykové pevnosti

Podmínka vzniku plastických bodů je znázorněna na obrázku č. 18. Červeně jsou znázorněny tlakové plastické body, černě plastické body tahové. Plastický bod je výsledkem dotyku Mohrovy kružnice se obalovou čarou pevnosti.

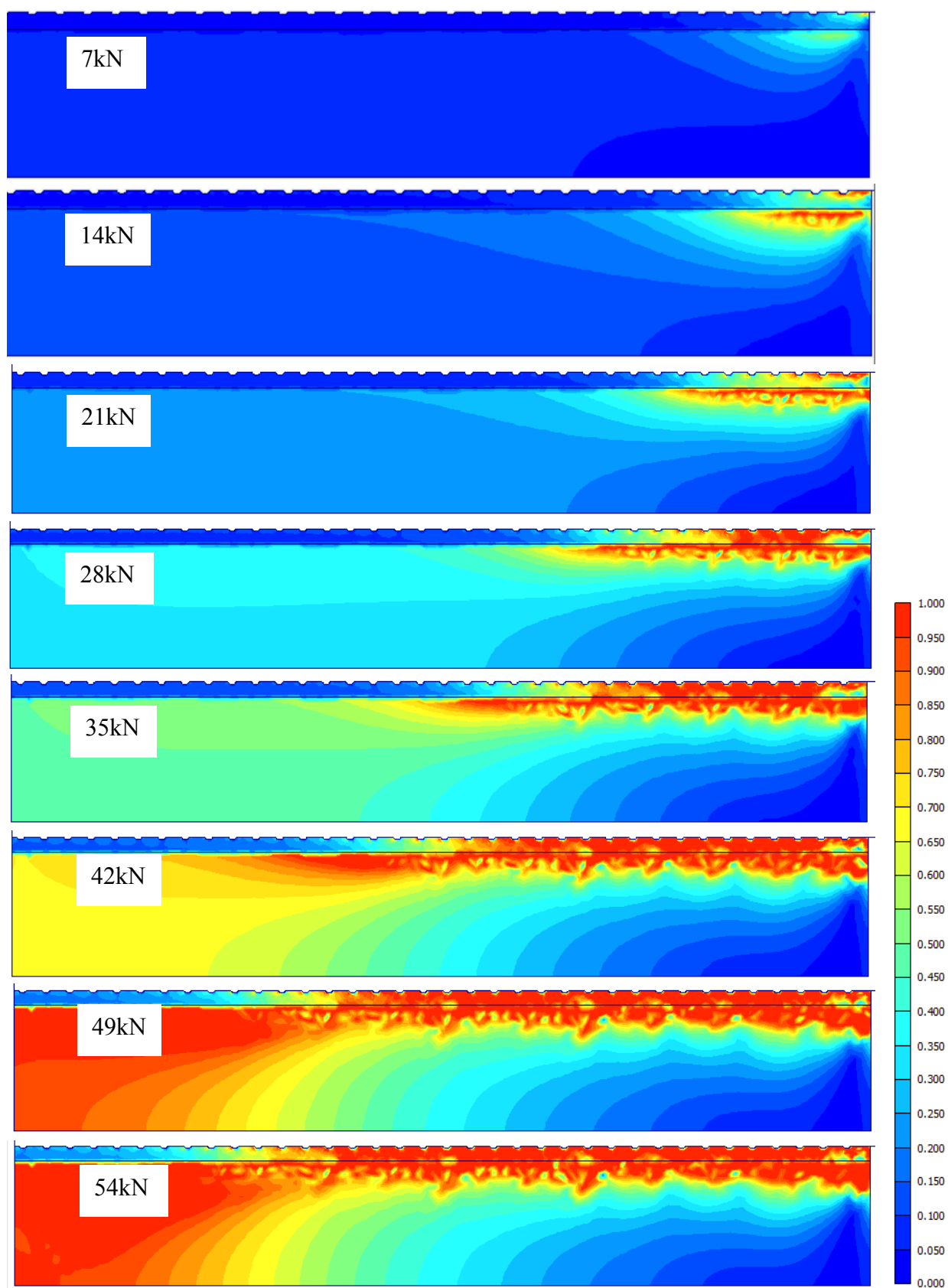


obrázek č. 18 – plastické body

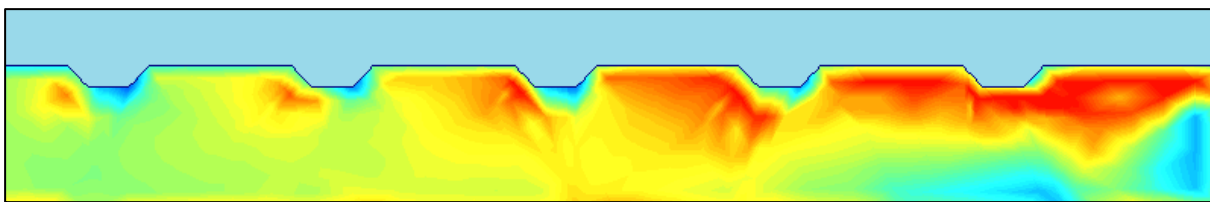
Na obrázku č. 19 je vyznačen výskyt plastických bodů, v těchto místech je samozřejmě extrémní poměrné přetvoření (funkce posunů, umístění) s význačnými směry přetvoření. Na těchto obrázcích lze v jasných liniích předpokládat vznik trhlin. Jedná se o trhliny spřažení - primární trhliny a o kónické trhliny - sekundární trhliny. Jakým směrem se poté kónické trhliny budou vyvíjet nelze s jistotou říci, pokud je však model v Plaxisu 2D axisymetrickou úlohou, trhliny rotují podél osy y, zasáhnou beton, a na kontaktu mezi tmelem a betonem dojde ke smykovému porušení. (obrázek 19, 20) Ve skutečnosti byl vzorek porušen tangenciálními tahovými trhlinami na kontaktu mezi tyčí a tmelem a žádné viditelné kónické trhliny nebyly rozpoznány. (obrázek č. 14, 26, 27)



obrázek č. 19 – nárůst poměrného přetvoření (vlevo), výskyt plastických bodů (vpravo)

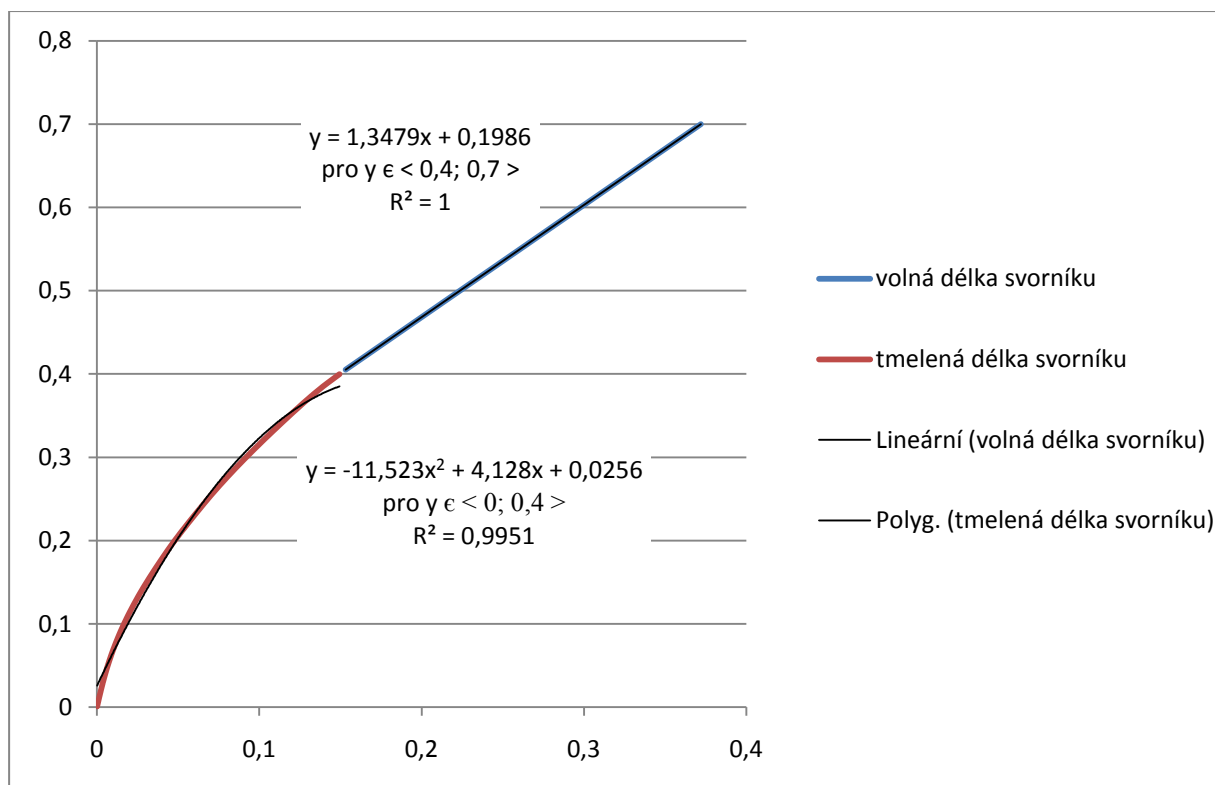


obrázek č. 20 – čerpání smykové pevnosti (RSS)



obrázek č. 21 – detail RSS v tmelu při tahové síle 21kN

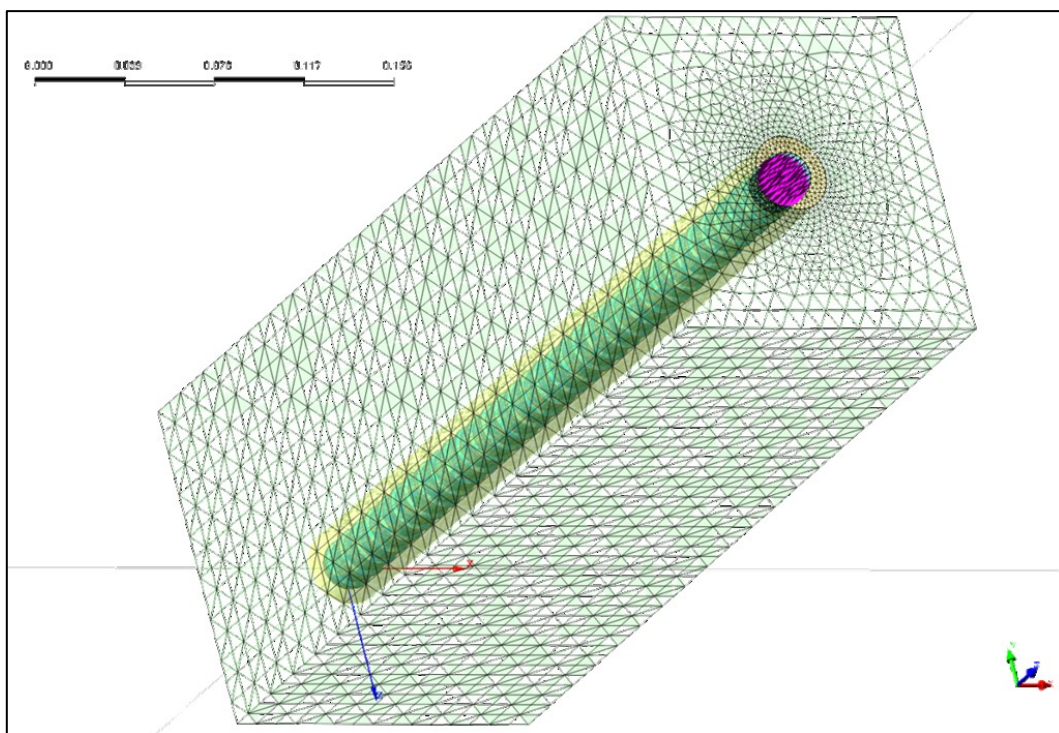
Modelováním byl také zkoumán průběh posunů po výšce svorníku:



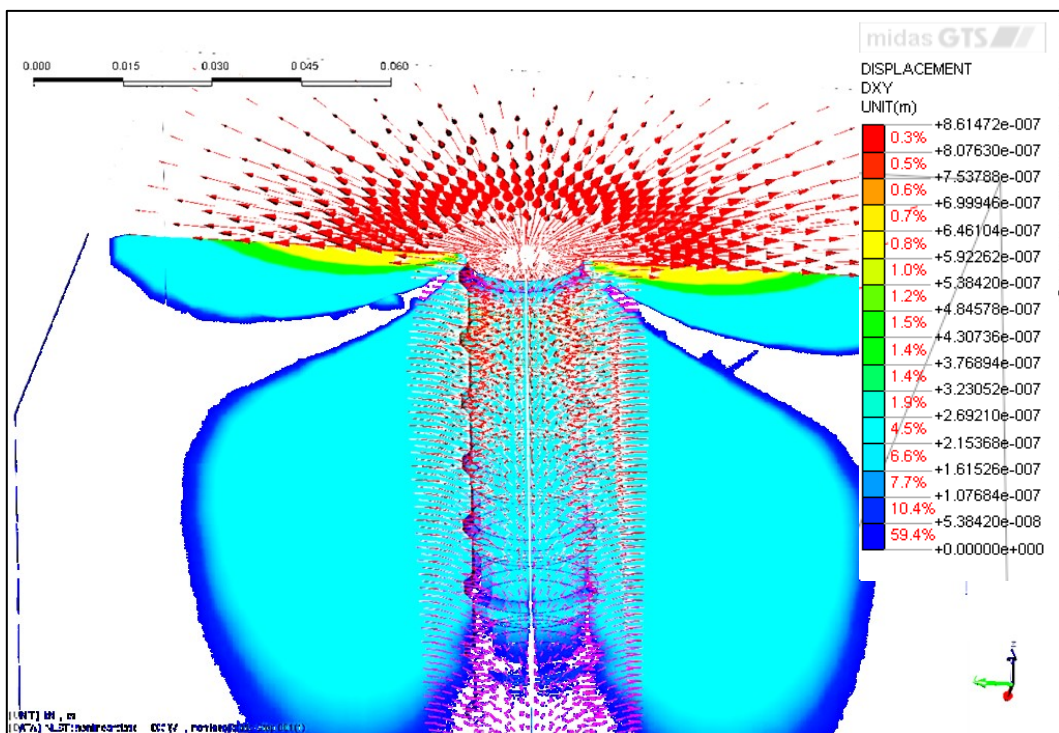
graf č. 11 – průběh posunů po výšce svorníku

Midas GTS

K ověření správnosti výsledků modelování v Plaxis 2D byl vytvořen stejný model v softwaru Midas GTS ve 3D úloze. Stejně jako v Plaxisu nelze zadat výztužný prvek –STRUCTURE– tak, aby byl do úlohy geometrií nadefinován vliv žebírek. Proto je v modelu tyč vložena jako -GROUND- tedy horninové prostředí s materiálovým modelem -LINEAR- s příslušnými vlastnostmi oceli. Okrajové podmínky byly stejně jako v Plaxisu definované tuhou vanou.

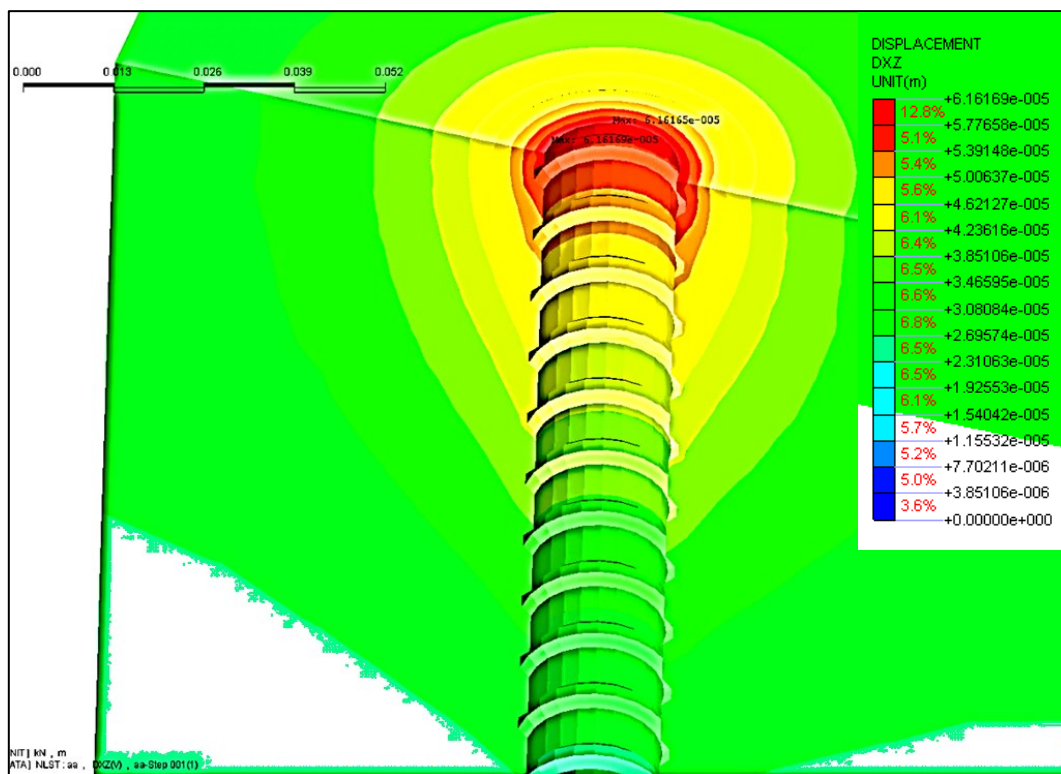


obrázek č. 21 - geometrie modelu svorníku v Midasu GTS

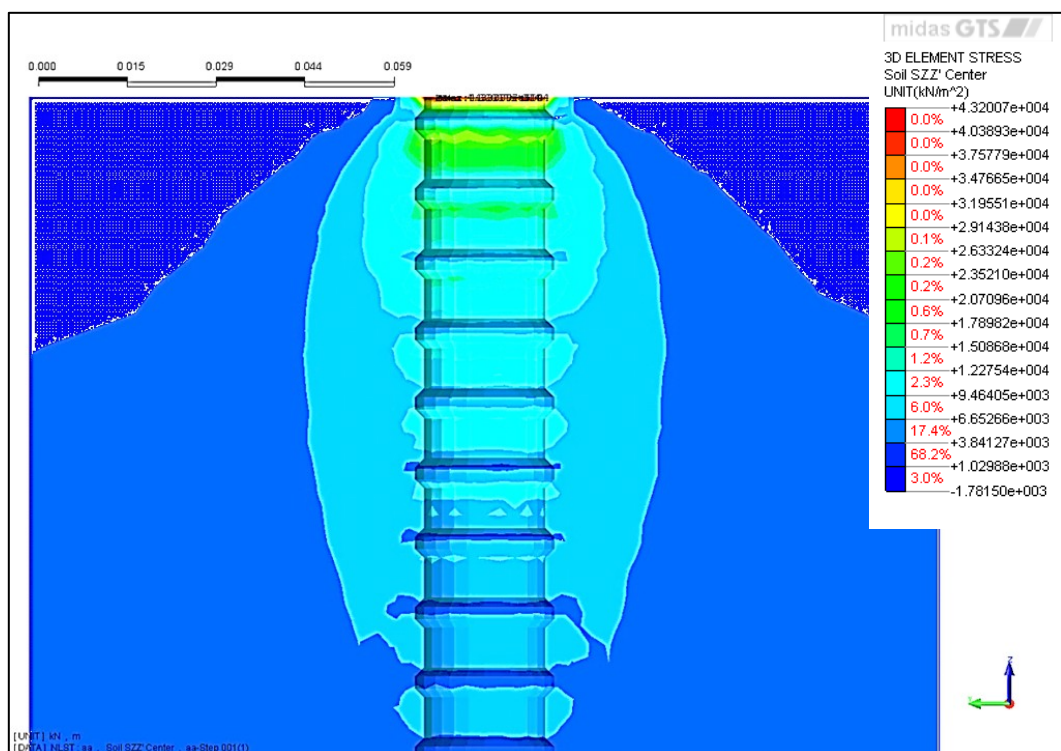


obrázek č. 22 – posuny ve směru os XY

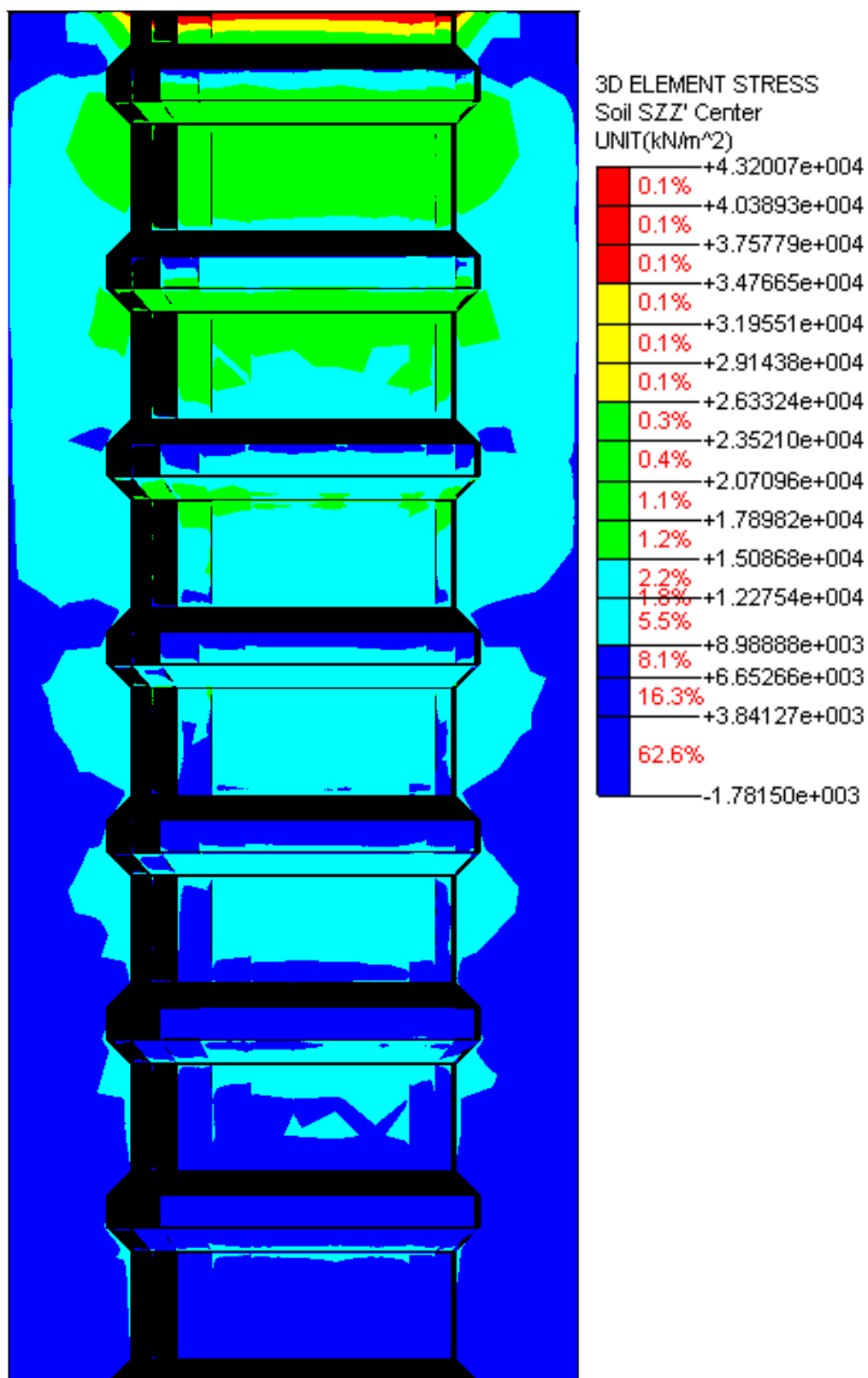
pozn.: radiální posuny tmele (v rovině kolmé na tyč) v horní části se tmel posouvá směrem od tyče, ve spodní části směřují vektory posunů k tyči



obrázek č. 23 – posuny ve směru DXZ (= posuny ve směru DXYZ)



obrázek č. 24 – efektivní napětí ve směru osy Z



obrázek č. 25 – detailní pohled na efektivní napětí kolem žebírek ve směru osy Z

Shrnutí praktické části

Laboratorní zkouškou svorníku bylo simulováno namáhání tahem zatíženého svorníku v reálném prostředí. Je zapotřebí si uvědomit, že v reálném prostředí svorník zasahuje do pasivní zóny zhruba půl metru a zbylá zdvižná délka je namáhána zcela opačným charakterem. Nejdříve je namáhán tmel, jehož prostřednictvím je namáhána tyč. Takový model je ale velice náročné realizovat. V kořenové délce svorníku se ale principy přenosu podobají modelu tahem zatížené tyče z prstence tmele. A tudíž je nutné upozornit, že v praktické části byla laboratorní zkouškou simulovaná pouze ta část svorníku, které je v reálném prostředí v kořenové délce svorníku.

Při zkoušení svorníku je vyvoláván tlak na prstenec tmele a kvádr betonu. Toto tlakové namáhání poté způsobí odlišný způsob porušení těchto okolních materiálů, který je kombinací porušení betonového kvádru namáhaného na tlak a porušení tangenciálními tahovými trhlinami.



obrázek č. 26 – pohled na svorník před jeho vytržením



obrázek č. 27 – pohled na svorník před jeho vytržením (pohled zespoda)



obrázek č. 28 – trhliny tlakem zatíženého betonu

Modelováním v MKP (metodou konečných prvků) byla simulovaná laboratorní zkouška svorníku. Model v MKP je ale zkeslený okrajovými podmínkami. Před generací sítě je zapotřebí zachytit okraje modelu do tuhé vany. Ve skutečnosti je ale svorník zavěšen. Tento rozdíl v definování odlišných okrajových podmínek způsobil odlišné vyvíjení trhlin. V MKP modelu je možné zaznamenat vývoj kónických trhlin podél svorníku. (obrázek č. 19)

Midas GTS je uživatelsky příjemný program. Jeho výstupy jsou graficky pěkné, ale nedokáže počítat čerpání smykové pevnosti. Proto jsou jeho výstupy představeny a je kladen důraz na podobnost výsledků mezi modelováním v Midasu a v Plaxisu, ale této úloze je přívětivější software Plaxis, který vyhodnocuje výskyt plastických bodů a čerpání smykové pevnosti, tedy vlastností, které naznačují potenciální smykovou plochu – kónickou trhlinu.

Pracovně deformační charakteristika (P-D křivka) svorníku, jako výstup modelování v Plaxisu, naznačuje, že teoreticky je svorník tužší, než v laboratorním prostředí. (graf č. 9) Tuhost teoretické P-D křivky je navýšena především z důvodu geometrických odchylek modelu (průřez jmenovité průměru je ve skutečnosti menších rozměrů, žebírka jsou vedena kolmo k tyči) materiálových rozdílů (malta je nedokonale zhutněna), nepřesností uložení tyče do prstence tmele (max. vychýlení 2mm) a hlavně definováním okrajových podmínek v numerickém modelu.

Vrchol P-D křivky odpovídá maximální hodnotě 54 kN, výše již dochází k plastickému porušení v tmelu. Do této chvíle byl svorník – triple systém – tyč, tmel, beton namáhán v pružné fázi a při vyšším zatížení již dochází k překročení Mohr-Coulombovy podmínky plasticity. Dále by se daly do modelu definovat vlastnosti na kontaktních površích - INTERFACE -, kterou by se definovaly prokluzu na těchto površích, ale systém trhlin je komplikovaný a smykové parametry na kontaktních plochách těchto trhlin jsou obtížně definovatelné.

Závěr

Diplomová práce poukazuje na možné způsoby ztráty únosnosti tahem zatížených svorníků tmelených po celé délce. Svorník, jakožto kompozice trojice únosných elementů (tyč, tmel, hornina) ztrácí svou únosnost porušením aspoň jednoho z těchto elementů nebo na jejich hranicích (na jejich kontaktních plochách či površích), přičemž se předpokládá, že tyto kontaktní plochy jsou považovány za nejslabší články únosnosti.

Vlastnosti tyče a tmelu jsou definovány příslušnými normami, které určují jejich kritické pevnostní a deformační charakteristiky. Dále legislativa ([6],[12]) stanovuje kritickou mezní sílu proti vytržení spolu se stanovením minimální tuhosti vazby.

Tahovými zkouškami svorníků v laboratorních podmínkách a v reálných podmínkách (např. [13],[19]) se zjistilo, že závislost mezní síly proti vytržení na kořenové délce je lineární. Tento předpoklad zjednodušuje návrh parametrů svorníků po jejich odzkoušení v IN-SITU. Nelze však odvodit nutnou kořenovou délku z pouze jedné tahové zkoušky, je zapotřebí svorník tahově namáhat při minimálně dvou různých kořenových délkách, neboť musí být znám sklon této závislosti mezní síly proti vytržení na kořenové délce.

Přídržnost je mnohdy používaný termín pro stanovení smykové únosnosti na kontaktu mezi tmelem a tyčí, ale v případě stanovení smykové únosnosti kořene, tedy mezní síly proti vytržení podělené kontaktní plochou, by neměl být tento termín používán, neboť přídržnost je stanovovaná odtahovou zkouškou a tedy její tahová pevnost je určována ve zcela jiném směru namáhání. Mnohdy je přídržnost zaměňována s pojmem smyková únosnost kořene, ale samotná smyková únosnost kořene není opět zcela přesný termín, neboť jak bylo v této práci představeno, namáhání vazby je velice složité a je složitou skladbou smyku, tlaku a tahu na dvou kontaktních površích a mezi nimi. Proto by u všech tmelů měla být uvedena pevnost v tahu, v tlaku a ve smyku a únosnost vazby by měla být uváděna v jednotkách síly Newton a ne v jednotkách Pascal (síla podělená kontaktní plochou).

Z laboratorní zkoušky vycházejí tyto závěry:

- Kořenová délka svorníku v reálném prostředí je zatěžována vnějším tlakem působící na stěny vývrtu, tahem tyče, který způsobuje vnitřní tlak relativními posuny

na kontaktu, nepůsobí zde ale tlak ve směru kolmém na svorník. Laboratorní zkouška aplikuje tlak na kvádr betonu, což vyvolává jiný druh namáhání a způsobuje tangenciální trhliny v betonu.

- Na základě tahových zkoušek dvou svorníků o různých kořenových délkách byla stanovena závislost mezní síly proti vytržení na kořenové délce, její rovnice zní:

$$l[m] = 0,005 \cdot F[kN] - 0,425$$

- Po tahové zkoušce svorníku byla použita tyč znovu odzkoušena na tah. Její pracovní deformační charakteristika je zobrazena v grafu č. 8, 9. Z těchto závěrů plyne, že tyč byla namáhána v pružné fázi pracovní deformační charakteristiky.
- Z pracovní deformační charakteristiky svorníků lze zaznamenat určitý konvexní versus konkávní charakter tuhosti svorníku. (graf č. 9) Konvexe je přisuzována dolehnutím tyče a jejím opřením se do tmele. Její jinak relativně pružný charakter oproti okolnímu více tuhému prostředí je zde omezován. Naopak konkáva, jež je zde promítnuta snížením úhlu od horizontály, tedy naopak poklesem modulu pružnosti, je výsledek vzniku primárních trhlin a smykání na kontaktním povrchu, které samozřejmě výslednou tuhost snižují.

Z modelování MKP vycházejí tyto závěry:

- Modelováním byla stanovena pracovní deformační charakteristika svorníku, která vykazuje vyšší tuhost svorníku než tuhost stanovená laboratorní zkouškou.
- Únosnost svorníku je stanovena hodnotou mezní síly 54 kN, při vyšších hodnotách zatížení se již předpokládá překročení Mohr-Coulombovy podmínky plasticity.
- Navyšování síly lze dále modelovat s přihlédnutím relativních posunů na kontaktní ploše mezi tmelem a tyčí. Modelováním lze takového efektu docílit definováním vztahů na kontaktních površích pomocí -INTERFACE-. Úloha však potřebuje detailnější analýzu relativních posunů na kontaktních površích a na plochách trhlin, přičemž stanovení deformačních parametrů na těchto diskontinuitách je problematické.

Použitá literatura

- [1] Aldorf Josef. *Mechanika podzemních konstrukcí.*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1999, str. 1-410. ISBN 80-7078-695-7
- [2] Aydan O. *The stabilisation of rock engineering structures by rock bolts.* Nagoya: Nagoya University; 1989. 202.
- [3] Aziz N., Jalaifar H. Concalves J. *Bolt Surface Configurations and Load Transfer Mechanism.* 2006 Coal Operators' Conference: The AusIMM Illawarra Branch. str. 236-244.
- [4] Aziz, N., Webb B. *Study of Load Transfer Capacity of Bolts Using Short Encapsulation Push Test.* 2003 Coal Operators' Conference: The AusIMM Illawarra Branch. str. 71-80.
- [5] Brinkgreve R.B.J. *Plaxis manual.* Netherlands: Balkema, 2002. ISBN 90-5809-508-8
- [6] BS 7861. Strata reinforcement support system components used in coal mines: Part 1: 2007 Specification for rockbolting, Part 2: 2009 Specification for flexible systems for roof reinforcement
- [7] Cao Chen, Nemcik Jan a Ren Ting. *Dilational Slip Angle of Rebar Bolts Under Axial Loading.* 2013 Coal Operators' Conference: The University of Wollongong. str. 156-162.
- [8] Hosp M., Wichter L. *Load Tests on Stretching Bodies for the Investigation of the Crack Formation in the Cement Grout Cover around Threadbar Anchors Atlas Copco R 32N and others,* kontakt: geotechnik@tu-cottbus.de, zdroj: Ing. Adam Janíček
- [9] Hutchinson D. Jean, Mark D. S. *Cablebolting in underground mines.* Richmond, B.C: BiTech Publishers, 1996. ISBN 09-210-9537-6.
- [10] Hyett A.J., Bawden W.F., Macsporrán G.R., Moosavi M. *A constitutive law for bond failure of fully-grouted cable bolts using a modified hoek cell,* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Volume 32, Issue 1, January 1995, str. 11-36, ISSN 0148-9062

- [11] Indraratna B., Kaiser, P. K. *Analytical model for the design of grouted rock bolts*. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 1990 Vol 14. No.4, str. 227-251.
- [12] Instrukce č. 7. Pracovní pravidla pro použití samostatné svorníkové výztuže, Důlní průzkum a bezpečnost Paskov, a.s., Vědecko-výzkumný uhelný ústav Ostrava - Radvanice, a.s.
- [13] Kilic A., Yasar E., Celik A.G., *Effect of grout properties on the pull-out load capacity of fully grouted rock bolt*, Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 17, Issue 4, October 2002, str. 355-362, ISSN 0886-7798
- [14] Pruška Jan. *Matematické modelování vlivu svorníků na napjatost a deformace horninového masivu*, zdroj: Doc. Dr. Ing. Jan Pruška
- [15] Scott, J. J. *Roof Bolting – A Sophisticated Art*. Coal, 1989 August, str. 59-69
- [16] Souček Kamil, Koniček Petr, Staš Lubomír, Šňupárek Richard, Ptáček Jiří. *Využití kotevních systémů v hlubinných dolech OKR a testování jejich únosnosti*. Tunel. 2012, roč. 21, č. 2, str. 4 - 10. ISSN 1211 – 0728
- [17] Satola I. *The axial load-displacement behavior of steel strands used in rock reinforcement*. Doctoral Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki, 2007. ISBN 978-951-2289-721
- [18] Tadolini Stephen C., Raymond A. Mazzoni. *Twenty-Four Conferences; More Than One-Hundred and Seventy Papers; Understanding Roof Bolt Selection and Design Still Remains Priceless*, International Conference on Ground Control in Mining.
- [19] www.minova.cz, příručky a technické listy společnosti Minova Bohemia s.r.o.